



Санкт-Петербургский
государственный
университет



МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

#КИМО2023



15 – 19 мая 2023

Санкт-Петербургский государственный университет

УДК 551.46

ББК 26.221

К 63

Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VII Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 г. — Санкт-Петербург: Своё издательство, 2023. — 529 С.
ISBN 978-5-4386-2269-7

В сборнике представлены материалы VII Всероссийской научной конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (КИМО-2023), посвященной обсуждению основных научных достижений молодых специалистов в разных областях океанологии. В рамках конференции рассматривались вопросы современной океанологии по секциям: физика океана, биология океана, химия океана, морская геология, морская геофизика, экология моря и рациональное природопользование, океанологическая техника и приборостроение, а также были представлены междисциплинарные физико-биологические исследования океана. На конференции представляли результаты, полученные в ходе экспедиционных и лабораторных исследований. Кроме того, уделялось внимание развитию современных методов изучения океана: численного моделирования, дистанционных методов зондирования Земли из космоса, а также использование искусственного интеллекта и машинного обучения для решения задач океанологии.

Редколлегия: к.г.н. Агафонова Е.А., Аглова Е.А., к.г.н. Атаджанова О.А., к.г.н. Башмачников И.Л., Баяндина Ю.С., д.г.н. Белоненко Т.В., Борисенко Г.В., к.б.н. Бугров Л.Ю., к.г.-м.н. Будько Д.Ф., к.ф.-м.н. Булгаков К.Ю., к.б.н. Виноградова Е.П., Глухов В.А., к.г.н. Гордеева С.М., к.т.н. Дерновский В.Л., Жданов И.А., д.г.н. Зимин А.В., к.г.н. Иванов Б.В., к.г.н. Кивва К.К., к.б.н. Кладченко Е.С., Кодряк К.В., к.г.-м.н. Козина Н.В., Колтовская Е.В., к.б.н. Колючкина Г.А., к.г.н. Коник А.А., к.г.н. Костылева А.В., к.ф.-м.н. Кубряков А.А., к.ф.-м.н. Кубрякова Е.А., Кудинов А.А., к.б.н. Кухарева Т.А., к.г.н. Латушкин А.А., к.б.н. Лобус Н.В., к.г.н. Май Р.И., к.г.-м.н. Овсепян Е.А., к.ф.-м.н. Подрезова Н.А., к.г.-м.н. Половков В.В., к.г.н. Полухин А.А., к.ф.-м.н. Пономаренко А.В., к.г.н. Рубчеля А.В., к.г.н. Сандалюк Н.В., к.г.н. Свергун Е.И., Соловьева М.А., Татаренко Ю.А., к.б.н. Тимофеев В.А., к.г.н. Тихонова Н.А., к.г.н. Толстикова А.В., к.ф.-м.н. Фролова Н.С., Хабибулина В.Р., к.б.н. Челебиева Э.С., Шпилев Н.Н., к.г.-м.н. Шульга Н.А., к.ф.-м.н. Юровская М.В., к.ф.-м.н. Юшманова А.В.

Материалы публикуются в авторской редакции.

Saint Petersburg State University

Complex Investigations of the World Ocean. Proceedings of the VII Russian Scientific Conference of Young Scientists, Saint Petersburg, May 15–19, 2023 Saint Petersburg: Svoe izdatel'stvo, 2023, 529 p.

ISBN 978-5-4386-2269-7

The conference proceedings presents extended abstracts of the participants of the VII all-Russian Scientific Conference of Young Scientists "Complex Investigations of the World Ocean" (CIWO-2023) dedicated to the discussion of the main scientific achievements of young specialists in the oceanology fields. Within the framework of the conference, issues of modern oceanology were considered in eight sections: Ocean Physics, Ocean Biology, Ocean Chemistry, Marine Geology, Marine Geophysics, Marine Ecology and Environmental Management, Oceanological Technology and Instrumentation, as well as interdisciplinary section - Physical and Biological Research of the Ocean. At the conference the results of cruises as well as laboratory research were presented. Moreover, attention has also been paid to the development of modern ocean research methods: numerical modeling, remote sensing, and the use of artificial intelligence and machine learning to solve oceanological problems.

Editorial board: PhD Agafonova E.A., Aglova E.A., PhD Atadzhanova O.A., PhD Bashmachnikov I.L., Bayandina Y.S., Dr. Belonenko T.V., Borysenko G.V., PhD. Bugrov L.Y., PhD Budko D.F., PhD Bulgakov K.Y., PhD Vinogradova E.P., Glukhov V.A., PhD Gordeeva S.M., PhD Dernovsky V.L., Zhdanov I.A., Dr. Zimin A.V., PhD Ivanov B.V., PhD Kivva K.K., PhD Kladchenko E.S., Kodryan K.V., PhD Kozina N.V., Koltovska E.V., PhD Koliuchkina G.A., PhD Konik A.A., PhD Kostyleva A.V., PhD Kubryakov A.A., PhD Kubryakova E.A., Kudinov A.A., PhD Kukhareva T.A., PhD Latushkin A.A., PhD Lobus N.V., PhD Mai R.I., PhD Hovsepyan E.A., PhD Podrezova N.A., PhD Polovkov V.V., PhD Polukhin A.A., PhD Ponomarenko A.V., PhD Rubchenia A.V., PhD Sandaliuk N.V., PhD Svergun E.I., Solovyeva M.A., Tatarenko Y.A., PhD Timofeev V.A., PhD Tikhonova N.A., PhD Tolstikov A.V., PhD Frolova N.S., PhD Khabibulina V.R., PhD Chelebieva E.S., Shpilev N.N., PhD Shulga N.A., PhD Yurovskaya M.V., PhD Yushmanova A.V.

Materials are published in the author's edition.



Содержание

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ОКЕАНА»	26
Осадчиев А.А., Адамовская П.О., Мысленков С.А., Дударев О.В., Семилетов И.П. ВЗМУЧИВАНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА МЕЛКОВОДНЫХ УЧАСТКАХ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ	26
Ахтямова А.Ф. ФРОНТАЛЬНЫЕ ЗОНЫ В ДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РАЙОНАХ МИРОВОГО ОКЕАНА	28
Благодатских Е.А., Атаджанова О.А., Зимин А.В. МАЛЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ КАК ИНДИКАТОР СУБМЕЗОМАСШТАБНОЙ ДИНАМИКИ В БОЛЬШИХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ОЗЕРАХ ПО РАДИОЛОКА- ЦИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ В БЕЗЛЕДНЫЙ ПЕРИОД 2021 И 2022 ГГ.	30
Витинг К.Б., Осадчиев А.А., Демешко Д.М. ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ И ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВОДНЫХ МАСС В ЖЕЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ	32
Гиппиус Ф.Н., Мысленков С.А. СЕЗОННЫЕ И МНОГОЛЕТНИЕ ТРЕНДЫ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ПРИБРЕЖ- НЫХ АКВАТОРИЯХ ЧЁРНОГО МОРЯ	34
Гиппиус Ф.Н., Демидов А.Н., Артамонова К.В., Крашенинникова С.Б. СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ВОД В РАЙОНАХ ТРАНСФОРМНЫХ РАЗЛОМОВ ТРО- ПИЧЕСКОЙ АТЛАНТИКИ ПО ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	36
Демешко Д.М., Осадчиев А.А., Витинг К.Б. ТУРБУЛЕНТНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ В ЖЕЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ ПО НАТУРНЫМ ДАННЫМ	38
Гордеева С.М., Дешова Д.В. КЛИМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОТОКОВ ВОДЫ, ТЕПЛА И СОЛИ В ПЕЧОРСКОМ МОРЕ	40
Диденкулов О.И., Диденкулова Е.Г., Пелиновский Е.Н. ВОЛНЫ-УБИЙЦЫ У БЕРЕГОВ РОССИИ	41
Диденкулова Е.Г. ВОЛНЫ-УБИЙЦЫ В 2005-2021: СТАТИСТИКА, АНАЛИЗ ВОЛНОВЫХ И ВЕТРОВЫХ УСЛОВИЙ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	43
Евстигнеева Н.А., Демьшев С.Г. АНАЛИЗ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В СЕВЕРНОЙ ЧА- СТИ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ АССИМИЛЯЦИИ В ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДАННЫХ ТРЕХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СЪЕМОК 2016 ГОДА	45

Егорова Е.С., Миронов Е.У. ОЦЕНКА СЕЗОННЫХ И МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЬДОВ ГРЕНЛАНДСКОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ	47
Ежова Е.А., Гавриков А.В. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СУДОВОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАДАРА	49
Елкин Д.Н., Зацепин А.Г., Шварцман Д.Р. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ БАРОКЛИННЫХ ВИХРЕЙ В ДВУХСЛОЙНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ	51
Жук В.Р., Кубряков А.А., Новиков Б.А., Медведева А.В. ОСОБЕННОСТИ ЛЕДОВОЙ ДИНАМИКИ ПРЕДПРОЛИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ЧУКОТСКОГО МОРЯ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД	53
Осадчиев А.А., Забудкина З.В., Рогожин В.С., Фрей Д.И., Гордей А.С., Спивак Э.А., Салюк А.Н., Семилетов И.П., Седаков Р.О. СТРУКТУРА ПЛЮМА ОБИ-ЕНИСЕЯ ПОЗДНЕЙ ОСЕНЬЮ ПЕРЕД ЛЕДООБРАЗОВАНИЕМ	54
Захарова Е.В., Ладохина Е.М., Попов С.К., Фомин В.В., Дианский Н.А. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ВЕТРОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЯМИ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В РЕГИОНЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В ОСЕННИЙ ПЕРИОД	56
Зуев О.А., Селиверстова А.М. ПОТОК АНТАРКТИЧЕСКОЙ ДОННОЙ ВОДЫ НА ВЫХОДЕ ИЗ КАНАЛА ВИМА	58
Иванов К.Д., Смирнов В.Н., Знаменский М.С. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИИ MOSAIC	60
Игнатьев Д.Е., Татаренко Ю.А., Фролова Н.С. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ПРОЛИВЕ БЪЕРКЕЗУНД ЗА ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2022 Г.	62
Казаков Д.А., Павлов М.И., Чухарев А.М. ВЕРИФИКАЦИЯ 1,5D-МОДЕЛИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА ПО ДАННЫМ ЗОНДИРОВАНИЙ 122 РЕЙСА НИС "ПРОФЕССОР ВОДЯНИЦКИЙ"	64
Каледина А.С., Башмачников И.Л. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЬДА НА ТЕМПЕРАТУРУ ВОЗДУХА В СЕВЕРО-ЕВРОПЕЙСКОМ БАССЕЙНЕ	66
Кивва К.К., Будянский М.В., Пранц С.В. КОМБИНАЦИЯ ЛАГРАНЖЕВА ПОДХОДА И МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПЕРЕНОСА ВОД (НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ОХОТСКОГО МОРЯ)	68

Кивва К.К., Будянский М.В., Пранц С.В. ВЫЯВЛЕНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОД ТИХООКЕАНСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ОХОТСКОМ МОРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАГРАНЖЕВА ПОДХОДА	70
Кивва К.К., Чульचेков Д.Н., Сомов А.А. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ВОД ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ СУБАРКТИЧЕСКОЙ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ ТИХОГО ОКЕАНА ВЕСНОЙ 2022 ГОДА	72
Козлов И.Е., Морозов Е.А., Башмачников И.Л., Петренко Л.А. МУЛЬТИ-СЕНСОРНЫЕ СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ОКЕАНСКИХ ВИХРЕЙ В ПРОЛИВЕ ФРАМА	74
Кондрашов А.А., Корж А.О. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕЧЕНИЙ НАД ГДАНЬСКО-ГОТЛАНДСКИМ ПОРОГОМ ПО ДАННЫМ ГИРЛЯНДЫ ИНКЛИНОМЕТРОВ	76
Коник А.А., Атаджанова О.А. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ДЕКАДНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ГРАДИЕНТОВ ТЕРМОХАЛИННЫХ ПОЛЕЙ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ	78
Копышов И.О., Козлов И.Е., Фрей Д.И., Сильвестрова К.П., Корженовская А.И., Медведев И.П., Гайский П.В., Осадчиев А.А., Степанова Н.Б. КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В КАРСКОМ МОРЕ	80
Коржуев В.А. ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ТОЛЩИНУ КВАЗИОДНОРОДНОГО СЛОЯ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ	81
Коробченкова К.Д., Стонт Ж.И., Ульянова М.О. СГОННО-НАГОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЗОНЕ СМЕШЕНИЯ РЕЧНЫХ И МОРСКИХ ВОД НА ПРИМЕРЕ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ	83
Котельников В.Д., Татаренко Ю.А., Подрезова Н.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В БЕЛОМ МОРЕ ПО НАТУРНЫМ ДАННЫМ ЗА ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2019-2022ГГ	85
Кочурова А.А., Зотова Е.В., Червяков М.Ю. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА НАД АКВАТОРИЯМИ БЕЛОГО, БА-РЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ЭКСПЕДИЦИИ «АРКТИЧЕСКИЙ ПЛАВУЧИЙ УНИВЕРСИТЕТ – 2022»	87
Кошкина В.С., Гавриков А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ КРИТЕРИЕВ ВЫДЕЛЕНИЯ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР В ДАННЫХ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ	89
Кравцова К.В., Подрезова Н.А. ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ В МНОГОСЛОЙНОЙ СРЕДЕ АТМОСФЕРА-СНЕГ-ЛЁД-ВОДА НА ПРИМЕРЕ ФИНСКОГО ЗАЛИВА	91

Круглова Е.Е., Мысленков С.А. ОСОБЕННОСТИ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА И ШТОРМОВОЙ АКТИВНОСТИ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ	93
Круглова К.А., Атаджанова О.А., Зимин А.В. ХАРАКТЕРИСТИКИ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В КУРИЛО-КАМЧАТСКОМ РЕГИОНЕ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД 2020 И 2021 ГОДАХ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	95
Кузнецова А.М., Досаев А.С., Поплавский Е.И., Троицкая Ю.И. ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА	97
Кукушкин В.М., Гулев С.К., Маркина М.Ю. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ	99
Кулик К.В., Фролова Н.С., Свергун Е.И., Зимин А.В. ОСОБЕННОСТИ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН ОХОТСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ	101
Куликова Ж.М., Гангнус И.А. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТИХООКЕАНСКИХ ВОД В МОРЯХ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА	103
Куприянова А.Е., Гриценко В.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ОБЪЕМОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ПЛАВУЧЕСТЬЮ: КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	105
Латонин М.М., Башмачников И.Л., Бобылев Л.П. ВЗАИМОСВЯЗЬ АРКТИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ С МЕРИДИОНАЛЬНЫМИ ОКЕАНИЧЕСКИМИ И АТМОСФЕРНЫМИ ПОТОКАМИ ТЕПЛА НА ВХОДЕ В АТЛАНТИЧЕСКИЙ СЕКТОР АРКТИКИ	107
Лис Н.А., Тимохов Л.А., Миронов Е.У., Егорова Е.С. СТАТИСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ДОЛГОПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ СУММАРНОЙ ЛЕДОВИТОСТИ БАРЕНЦЕВА И ГРЕНЛАНДСКОГО МОРЕЙ ЗА ПЕРИОД 1950-2021 ГОДЫ	108
Лондикова Н.В., Медведев И.П. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ	110
Лубков А.С., Воскресенская Е.Н. ОПЫТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЯВЛЕНИЙ ЭЛЬ-НИНЬО И ЛА-НИНЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	112
Лыжков Д.А., Журбас Н.В., Кузьмина Н.П. О КЛАСТЕРИЗАЦИИ ТЕРМОХАЛИННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АТЛАНТИЧЕСКОЙ ВОДЫ В АРКТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ (STD-ДАННЫЕ NAVOS)	114

Мальшева А.А., Белоненко Т.В., Будянский М.В. ЛАГРАНЖЕВЫЙ МЕТОД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АГУЛЬЯСОВА ПЕРЕНОСА В РАЙОНЕ СМЕШЕНИЯ ВОД	116
Маховиков А.Д., Смагин Р.Е. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУИЗОЛИРОВАННЫХ ПРИЛИВНЫХ АКВАТОРИЙ БЕЛОГО МОРЯ (С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ)	117
Медведева А.В., Станичный С.В., Василенко Н.В. ТЕМПЕРАТУРА ПОВЕРХНОСТИ МРАМОРНОГО МОРЯ И ТУРЕЦКИХ ПРОЛИВОВ ПО ДАННЫМ LANDSAT-8/9	119
Мехова О.С., Смирнова Д.А., Кречик В.А., Фрей Д.И. СТРУКТУРА АБИССАЛЬНОГО ПОТОКА ААДВ В ПРОХОДЕ КЕЙН	121
Мысленков С.А. МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В МОРЯХ ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ	123
Наурызбаева Ж.К., Холопцев А.В. ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ БЛОКИНГОВ НАД КАСПИЙСКИМ МОРЕМ ЗИМОЙ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА ERA 5	125
Новоселова Е.В., Белоненко Т.В., Жмур В.В. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВЯЙСЯЛЯ-БРЕНТА В ЦИКЛОНАХ И АНТИЦИКЛОНАХ НА ПРИМЕРЕ ЛОФОТЕНСКОЙ КОТЛОВИНЫ	127
Онищенко Н.А., Медведева А.Ю., Медведев И.П., Архипкин В.С. ЦУНАМИ ЧЕРНОГО МОРЯ (1927, 1939, 1966 ГОДОВ)	128
Остроумова С.А., Дрозд И.Д., Фрей Д.И. ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СУБАНТАРКТИЧЕСКОГО ФРОНТА В ПРОЛИВЕ ДРЕЙКА	130
Павлов М.И., Чухарев А.М. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ ЛЕНГМЮРА НА ПРИПОВЕРХНОСТНУЮ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ	132
Павлушин В.А., Кубряков А.А. ДИНАМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА БЕНГЕЛЬСКОГО АПВЕЛЛИНГА И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА ТРАНСПОРТ СОЛИ	134
Пиваев М.Д., Софьина Е.В., Романенков Д.А., Зимин А.В. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНУТРЕННИХ ВОЛН ПО ФОНОВОЙ СТРАТИФИКАЦИИ И ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ АВАЧИНСКОГО ЗАЛИВА ТИХОГО ОКЕАНА	136
Полонянкин Д.А., Лубков А.С., Воскресенская Е.Н. ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ВЕТРЫ НА ТЕРРИТОРИИ КРЫМА И ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЯХ: СОВРЕМЕННОЕ И БУДУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ	138

Пономарев А.А., Подрезова Н.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ В БЕЛОМ МОРЕ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2021 Г.	140
Поплавский Е.И., Кузнецова А.М., Троицкая Ю.И. АНАЛИЗ ПАРАМЕТРИЗАЦИЙ В МОДЕЛИРОВАНИИ УРАГАНОВ В АТМОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ WRF	142
Рогожин В.С., Осадчиев А.А., Коновалова О.П. СТРУКТУРА И ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛЮМА РЕКИ ПЕЧОРА В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ	144
Родикова А.Е., Гордеева С.М. КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЕРХНЕГО КВАЗИОДНОРОДНОГО СЛОЯ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ	146
Романенко В.А. ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПОТОКОВ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ АНСАМБЛЯ МОДЕЛЕЙ SMIP6	148
Романов И.А., Подрезова Н.А. АЙСБЕРГИ МОРЯ РОССА	150
Романюкина С.А., Подрезова Н.А. ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОЩАДИ ЛЬДА БЕЛОГО МОРЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СУРОВОСТИ ЗИМ	152
Ромащенко Д.Д., Булгаков К.Ю. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПРОФИЛЯ ВЕТРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ВЕТРОВЫХ ВОЛН	153
Рубакина В.А., Кубряков А.А., Станичный С.В., Медведева А.В. МОДЕЛИРОВАНИЯ СОБЫТИЙ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ДНЕВНОГО ПРОГРЕВА В ЧЕРНОМ МОРЕ НА ОСНОВЕ ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ ROM	155
Руденко Н.О., Иванов Б.В. ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ЛЕДОВИТОСТИ В ЗАПАДНОМ СЕКТОРЕ АРКТИКИ НА ПРИМЕРЕ АРХИПЕЛАГОВ ШПИЦБЕРГЕН И ЗЕМЛЯ ФРАНЦА-ИОСИФА	157
Рыбалко А.Д., Мысленков С.А. Архипкин В.С. КЛАССЫ ЧАСТОТНЫХ СПЕКТРОВ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ЧЕРНОМ И АЗОВСКОМ МОРЯХ	159
Криницкий М.А., Савин А.С., Осадчиев А.А. РЕГИОНАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ СПУТНИКОВОЙ СОЛЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА ДЛЯ МОРЕЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ	161
Свергун Е.И., Коник А.А., Зимин А.В. КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В ОБЛАСТИ СТОКОВОЙ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ КАРСКОГО МОРЯ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД 2019 ГОДА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ	163

Свергун Е.И., Софьина Е.В., Зимин А.В. СОЛНЕЧНОЕ ТРОПИЧЕСКОЕ НЕРАВЕНСТВО ПРИЛИВОВ КАК ОДНА ИЗ ПРИ- ЧИН СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТ- РЕННИХ ВОЛН В КУРИЛО-КАМЧАТСКОМ РЕГИОНЕ	165
Семенихина А.Ю., Подrezова Н.А. ИЗМЕНЕНИЕ МАССЫ И ВЫСОТЫ ЛЕДНИКА ГРЕНЛАНДИИ	167
Семиделова А.О., Подrezова Н.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДВОДНОГО ЗВУКОВОГО КАНАЛА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ .	168
Сильвестрова К.П., Мехова О.С., Круглова Е.Е., Мысленков С.А., Осадчиев А.А., Степанова Н.Б. КРАТКОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОД АРКТИ- КИ В РЕЙСЕ ПЛАВУЧЕГО УНИВЕРСИТЕТА ИОРАН В 2021 ГОДУ	170
Смирнова Д.А., Фрей Д.И., Медведев И.П. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОРОСТИ ПОТОКА АНТАРКТИЧЕСКОЙ ДОННОЙ ВОДЫ В АБИССАЛЬНОМ КАНАЛЕ ВИМА	172
Степина А.А., Подrezова Н.А. ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ ПЛОЩАДИ ЛЬДА КАРСКОГО МОРЯ	174
Стокос А.К., Кудрявцев В.Н., Хворостовский К.С. БАРОТРОПНЫЙ ОТКЛИК БАРЕНЦЕВА МОРЯ НА ПОЛЯРНЫЕ ЦИКЛОНЫ	176
Сумкина А.А., Кивва К.К., Иванов В.В. СУММАРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПОВЕРХНОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ В ЛЕТ- НИЙ И ЗИМНИЙ ПЕРИОДЫ	178
Сухонос П.А. АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВЕРХ- НЕГО СЛОЯ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ ПО ДАННЫМ РЕ- АНАЛИЗА ORA-S3 ЗА 1980–2011 ГГ.	180
Титовской А.В., Фролова Н.С., Заболотских Е.В. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА БЕ- РИНГОВА МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ	182
Травкин В.С., Жмур В.В., Белоненко Т.В. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ МЕЗОМАСШТАБ- НЫХ ВИХРЕЙ ЛОФОТЕНСКОЙ КОТЛОВИНЫ	184
Травкин В.С., Белоненко Т.В. ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО ЖЕЛОБА	186
Трегубов А.С., Диденкулова Е.Г., Кокорина А.В., Диденкулов О.И. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ КОНЕЧНЫХ АНСАМБЛЕЙ НЕРЕГУ- ЛЯРНЫХ ВОЛН	188

Удалов А.А., Будянский М.В., Пранц С.В. МЕЗОМАСШТАБНЫЕ КУРИЛЬСКИЕ ВИХРИ В ЭПОХУ АЛЬТИМЕТРИИ: ПЕРЕПИСЬ И СВОЙСТВА	190
Устинова Т.С., Волков А.С., Волков В.А. ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ АЙСБЕРГОВ НА ОСНОВЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ АЙСБЕРГОВОЙ УГРОЗЫ	192
Устинова Т.С. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ БА-РЕНЦЕВА МОРЯ ПО ДАННЫМ МИКРОВОЛНОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	193
Фокина К.В. ПРОВЕРКА УСКОРЕННОГО ПОДХОДА К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЛН	194
Фрей Д.И., Кречик В.А., Гордей А.С. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЙ В ПРОЛИВЕ БРАНСФИЛДА ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ	196
Худякова С.П., Белоненко Т.В. ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В РАЙОНЕ АЛЕУТСКОЙ ГРЯДЫ	198
Цедрик С.В. МОДЕЛЬ ДРЕЙФА ШХУНЫ "СВЯТАЯ АННА" ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗОВ NOAA-CIRES-DOE 20CR И ERA-20C	199
Цуканова Е.С., Медведев И.П. ПРОЯВЛЕНИЕ ВОЛН ЦУНАМИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ТОНГА В 2022 ГОДУ В ЯПОНСКОМ МОРЕ	201
Цыпкин И.Ю., Подрезова Н.А. КЛИМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ПЛОЩАДИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ	203
Шабанов П.А., Баранская А.В. РАСШИРЕНИЕ БЕЗЛЁДНОГО ПЕРИОДА В КАРСКОМ МОРЕ И МОРЕ ЛАПТЕВЫХ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	205
Шаратунова М.В., Иванов В.В. ОЦЕНКА ВОЗРАСТНОГО СОСТАВА ЛЬДОВ В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ В КОНЦЕ ЗИМНЕГО ПЕРИОДА	207
Ширыборова А.И., Медведев И.П., Архипкин В.С. СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ АЗОВСКОГО МОРЯ: НАБЛЮДЕНИЯ И ЧИС-ЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	209
Ширыборова А.И., Медведев И.П., Архипкин В.С. ПРИЛИВНЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ КАЛИФОРНИЙСКОГО ЗАЛИВА	211

Шишкова П.О., Медведев И.П. АНАЛИЗ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ	213
Шука А.С., Шука С.А., Недоспасов А.А., Замятин И.А., Кременецкий В.В. МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ТЕРМОХАЛИННОГО РЕЖИМА В ЗАЛИВЕ БЛАГОПОЛУЧИЯ КАРСКОГО МОРЯ	214
Яковлева Д.А., Башмачников И.Л. ИЗМЕНЕНИЕ ПОТОКОВ ТЕПЛА ОКЕАН-АТМОСФЕРА И СКОРОСТИ ВЕТРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИНТЕНСИВНОСТИ АМОЦ	216
СЕКЦИЯ «БИОЛОГИЯ ОКЕАНА»	218
Артемьев Г.М., Захаров Д.В., Баталин Г.А., Гареев Б.И., Мингазов Г.З., Сабиров Р.М., Голиков А.В. ТРОФИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ ЩЕТИНКОЧЕЛЮСТНЫХ БАРЕНЦЕВА МОРЯ В УСЛОВИЯХ ПОЛЯРНОЙ НОЧИ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ АЗОТА ($\delta^{15}\text{N}$)	218
Белов Д.А., Кременецкая А.В., Крылова Е.М. ХЕМОСИМБИОТРОФНЫЕ ДВУСТВОРЧАТЫЕ МОЛЛЮСКИ <i>CALYPTOGENA PACIFICA</i> (<i>BIVALVIA: VESICOMYIDAE: PLIOCARDIINAE</i>) В РАЙОНЕ МЕТАНОВЫХ ВЫХОДОВ БЕРИНГОВА МОРЯ: ГЕНЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И СВЯЗЬ С ПОПУЛЯЦИЯМИ ВОСТОЧНОЙ ПАЦИФИКИ	220
Шалагина Н.Е., Богданович Ю.В. ВЛИЯНИЕ ХОЛОДОВОГО ШОКА НА ЭРИТРОЦИТЫ <i>SCORPAENA PORCUS</i> (LINNAEUS, 1758) В УСЛОВИЯХ IN VITRO	222
Богданович Ю.В., Рычкова В.Н., Шалагина Н.Е. МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕМОЦИТОВ <i>ANADARA KAGOSHIMENSIS</i> (ТОКUNAGA, 1906) В УСЛОВИЯХ ОСТРОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГИПОКСИИ	224
Боровкова К.А., Мошаров С.А. СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ФИТОПЛАНКТОНА НА МОРСКОМ КАРБОНОВОМ ПОЛИГОНЕ «РОСЯНКА»	226
Бычкова У.В., Воробьева О.В., Романова Н.Д. БАКТЕРИОПЛАНКТОН ЗАЛИВА БЛАГОПОЛУЧИЯ АРХИПЕЛАГА НОВАЯ ЗЕМЛЯ.	228
Василенко Л.Н., Хмель Д.С. К ТАКСОНОМИИ СЕМЕЙСТВА <i>CARPOCANIIDAE (RADIOLARIA)</i>	230
Власова Е.В., Сабиров Р.М., Голиков А.В. РЕПРОДУКТИВНАЯ БИОЛОГИЯ САМЦОВ КАРАКАТИЦ (<i>CERHALOPODA, SEPIIDA</i>) ИЗ ВОД ЮЖНОЙ АФРИКИ	232
Дюрдеева А.А., Масалева К.Р. ЗАЛИВ ВОСТОК: ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ ПО СОДЕРЖАНИЮ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОЛГОЖИВУЩИХ МИТИЛИДАХ	234

Еськова А.И., Пономарева А.Л. ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕФТЕОКИСЛЯЮЩИХ БАКТЕРИЙ ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЯПОНСКОГО МОРЯ В ЗА- ВИСИМОСТИ ОТ ПРИСУТСТВИЯ И ОТСУТСТВИЯ ГАЗОГИДРАТОВ	236
Зайдыков И.Ю., Наумова Е.Ю., Суханова Л.В. ПОЛИМОРФИЗМ МТДНК <i>MACROHECTOPUS BRANICKII</i> DYBOWSKY, 1974 (<i>AMPHIRODA</i>) – КЛЮЧЕВОГО ПЕЛАГИЧЕСКОГО ЭНДЕМИЧНОГО ВИДА ОЗЕРА БАЙКАЛ	238
Зверева А.Ю., Орлова Т.Ю., Морозова Т.В. ИЗУЧЕНИЕ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ И ИХ ПОКОЯЩИХСЯ СТАДИЙ В ПОВЕРХНОСТ- НЫХ ОСАДКАХ АМУРСКОГО ЗАЛИВА ЯПОНСКОГО МОРЯ	240
Зенина А.И., Голиков А.В., Неверов О.Д., Власова Е.В., Новиков А.А. ВЛИЯНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА СОСТАВ МЕЙОФАУНЫ ТРО- ПИЧЕСКИХ МОРСКИХ АКВАРИУМОВ И СОПРЯЖЕННЫХ ФИЛЬТРОВ	242
Казакова Д.М., Полунина Ю.Ю., Губанова А.Д. ОСОБЕННОСТИ ТАКСОНОМИИ И МОРФОЛОГИИ ВИДОВ РОДА <i>PSEUDOCALANUS</i> В БАЛТИЙСКОМ И ЧЁРНОМ МОРЯХ	244
Казакова Е.Ю., Дмитриева О.А. ФИТОПЛАНКТОН ФИНСКОГО ЗАЛИВА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В ИЮЛЕ 2021-2022 ГОДАХ	246
Кладченко Е.С., Ткачук А.А., Андреева А.Ю. ВНУТРИКЛЕТОЧНЫЕ УРОВНИ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА И МЕМБРАН- НЫЙ ПОТЕНЦИАЛ МИТОХОНДРИЙ ГЕМОЦИТОВ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮС- КОВ В УСЛОВИЯХ ГИПООСМОТИЧЕСКОГО СТРЕССА	248
Ключанцева А.П., Лукашева Т.А. АКТИВНОЕ РАЗВИТИЕ НОЧЕСВЕТКИ (<i>NOCTILUCA SCINTILLANS</i>) У ПОБЕРЕЖЬЯ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ В 2022 ГОДУ	250
Коновалов Д.С., Назукова Ю.О. ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ БОГАТСТВО СООБЩЕСТВ МАКРОЗООБЕНТОСА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ Г. ПЕТРОЗАВОДСК	252
Коробченкова К.Д., Семёнова А.С., Дмитриева О.А., Ульянова М.О. ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИТО- И ЗООПЛАНК- ТОНА В СИСТЕМЕ Р. ПРЕГОЛЯ – КМК – КАЛИНИНГРАДСКИЙ (ВИСЛИНСКИЙ) ЗАЛИВ – БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ В 2022 Г.	254
Коростелев Н.Б., Беляков В.В., Буш А.Г., Орлов А.М. ВОЗРАСТ И РОСТ КЛЮВОРЫЛОЙ АНТИМОРЫ <i>ANTIMORA ROSTRATA</i> (<i>MORIDAE</i> , <i>GADIFORMES</i>) В РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТЯХ АРЕАЛА	256
Логинова Н.Б., Поважный В.В. СООТНОШЕНИЕ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ БИОПРОДУКТИВ- НОСТИ ЗООПЛАНКТОНА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ	258

Никитенко А.И., Строганов А.Н., Артеменков Д.В., Беляев В.А. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОРМЫ ОТОЛИТОВ АФРИКАНСКОЙ СКУМБРИИ В ВОДАХ ЦВА	260
Подзорова Д.В. ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ И ПЛОТНОСТЬ ПОСЕЛЕНИЙ ПОЛИХЕТ-ДЕТРИТОФАГОВ В ВЕРШИННОЙ ЧАСТИ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ (2013—2019 ГГ.)	262
Зинов А.А., Пономарева А.А. ВИДОВОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ФИТОПЛАНКТОНА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2021 ГОДА (ГАЙОТ КОКО, ИМПЕРАТОРСКИЙ ХРЕБЕТ, ТИХИЙ ОКЕАН)	264
Пыркин В.О., Гавирова Л.А., Строева А.Р., Меркель А.Ю., Ахманов Г.Г., Бонч-Осмоловская Е.А. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СООБЩЕСТВ УГЛЕВОДОРОДОКИСЛЯЮЩИХ МИКРООРГАНИЗМОВ БАРЕНЦЕВА И ПЕЧОРСКОГО МОРЕЙ	266
Рокотова А.Г., Рычкова В.Н., Кухарева Т.А., Солдатов А.А. ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭРИТРОПОЭЗА В ГЕМОПОЭТИЧЕСКИХ ТКАНЯХ КЕФАЛИ-СИНГИЛЯ (<i>CHELON AURATUS</i> (RISSE, 1810)) НА ПРОТЯЖЕНИИ ГОДОВОГО ЦИКЛА	268
Смирнова М.М., Рыльков О.В. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И «ЦВЕТЕНИЯ» ФИТОПЛАНКТОНА В ЛИТОРАЛИ КУРШСКОГО ЗАЛИВА В 2018-2021 ГГ.	270
Тимченко А.И., Симакова У.В., Портнова Д.А. МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ И ГЕНЕТИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ СВОБОДНОЖИВУЩЕЙ НЕМАТОДЫ <i>THERISTUS MELNIKOVI</i> TCHESUNOV, 1986 (<i>XUALIDAE</i>) В МОРСКИХ ЛЬДАХ БЕЛОГО И КАРСКОГО МОРЕЙ	272
Тимченко А.И., Портнова Д.А. ФАУНА СЕЗОННЫХ МОРСКИХ ЛЬДОВ В КАРСКОМ И ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЯХ	274
Тришкин А.В., Казакова Д.М., Ежова Е.Е. ИХТИОПЛАНКТОН ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКИ В ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД 2017 ГОДА	276
Уфимцева М.А., Муханов В.С. ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВИРУСНЫХ ЧАСТИЦ В ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ	278
Федоров А.В., Бородулина П.А., Ключанцева А.П., Хоменко С.А. ФИТОПЛАНКТОН ГОЛУБОЙ И ГЕЛЕНДЖИКСКОЙ БУХТ (Г.ГЕЛЕНДЖИК) В 2022 Г.	280
Шульгина М.А., Шевченко О.Г. МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ДОМИНИРУЮЩЕГО ВИДА <i>THALASSIOSIRA TENERA</i> (<i>BACILLARIOPHYTA</i>) В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ.	282
СЕКЦИЯ «МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ»	284

Богданов А.А., Видищева О.Н., Большакова М.А., Рязанцева К.Ю., Немченко Н.В., Ахманов Г.Г., Соловьева М.А. ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗОН ФОКУСИРОВАННОЙ ФЛЮИДРАЗГРУЗКИ ОЗЕРА БАЙКАЛ	284
Гершелис Е.В. РОЛЬ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ В СОХРАНЕНИИ И ПРЕОБРАЗОВАНИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В МОРЯХ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ	286
Кременчуцкий Д.А., Гуров К.И. ОЦЕНКА СКОРОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ ПО РАДИОНУКЛИДАМ	288
Калгин В.Ю., Обжиров А.И., Еськова А.И., Легкодимов А.А. ПИРИТ И ЕГО РОЛЬ В ДЕГАЗАЦИИ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНОВ НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЮЖНО-КИТАЙСКОГО МОРЯ	290
Киль А.О., Полудеткина Е.Н., Юмашева А.К., Басова Е.Д., Кирсанова А.А. ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ФЛЮИДОВ ДОННЫХ ОСАДКОВ ПРОГИБА УЕДИНЕНИЯ, СЕВЕРО-КАРСКИЙ БАССЕЙН	292
Кирсанова А.А., Полудеткина Е.Н., Басова Е.Д. ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОН ФЛЮИДРАЗГРУЗКИ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРО-КАРСКОЙ ДЕПРЕССИИ	294
Кишанков А.В., Полудеткина Е.Н., Юмашева А.К., Басова Е.Д., Кирсанова А.А., Токарев М.Ю. УТОЧНЕНИЕ ИСТОРИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ МЕГАВАЛА НАЛИВКИНА (КАРСКОЕ МОРЕ)	296
Козина Н.В., Кравчишина М.Д., Новичкова Е.А., Сломнюк С.В., Филиппов А.С., Киреенко Л.А. АУТИГЕННЫЕ МИНЕРАЛЫ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЮЖНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ (ПО МАТЕРИАЛАМ 89-ОГО РЕЙСА НИС «АКАДЕМИК МСТИСЛАВ КЕЛДЫШ» 2022 ГОДА)	298
Колтовская Е.В., Немировская И.А. НЕФТЯНЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ В БАРЕНЦЕВОМ, КАРСКОМ И ЛАПТЕВЫХ МОРЯХ В 2016-2020 ГГ.	300
Кулешова Л.А., Баширова Л.Д., Дорохова Е.В., Новичкова Е.А. ПАЛЕООКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В РАЙОНЕ ДРИФТА ГАРДАР (СЕВЕРО-ВОСТОЧНАЯ АТЛАНТИКА) В ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНОЕ ВРЕМЯ	302
Ласкина Д.Н., Дорохова Е.В. ЛИТОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛОНКИ ДОННЫХ ОСАДКОВ, ОТОБРАННОЙ НА ПУТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАТОКОВ СЕВЕРОМОРСКИХ ВОД В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ	304
Лозинская Л.А., Матуль А.Г., Новичкова Е.А., Чеховская М.П. МИКРОПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИЙ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БЕНТОСНЫХ ФОРАМИНИФЕР ИЗ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НОРВЕЖСКОГО МОРЯ	306

Мельникова А.А., Казарина Г.Х., Чеховская М.П., Киреенко Л.А., Новичкова Е.А. ПАЛЕОЭКОЛОГИЯ ДИАТОМЕЙ И ПАЛЕООКЕАНОЛОГИЯ ГОЛОЦЕНА ЛОФОТЕНСКОЙ КОТЛОВИНЫ НОРВЕЖСКОГО МОРЯ	308
Меренкова С.И., Малахова Л.В., Иванов В.Е., Малахова Т.В., Бобко Н.И., Капранов С.В. РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ ПО ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ	310
Мигдисова И.А., Стародымова Д.П., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н., Булохов А.В. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА РАССЕЯННОГО ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА В НОРВЕЖСКО-ГРЕНЛАНДСКОМ БАССЕЙНЕ	312
Мусатов А.Е. ГЛОБАЛЬНЫЕ ОЛЕДЕНЕНИЯ И ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ РУДОГЕНЕЗ В ПРЕДЕЛАХ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА. ЕСТЬ ЛИ ВЗАИМОСВЯЗЬ?	314
Наумов И.А., Дорохова Е.В. НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ЛИТОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСАДКОВ САМБИЙСКО-КУРШСКОГО ПЛАТО (ЮГО-ВОСТОЧНАЯ БАЛТИКА)	316
Полтавская Н.А., Гершелис Е.В., Гринько А.А., Чаркин А.Н., Ярощук Е.И., Гусева Н.В., Семилетов И.П. ГЕОХИМИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ДОННЫХ ОСАДКОВ ЧАУНСКОЙ ГУБЫ (ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ МОРЕ)	318
Пономаренко Е.П., Пугачёва Т.Л. УСЛОВИЯ СЕДИМЕНТАЦИИ В ГОТЛАНДСКОМ БАССЕЙНЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ	320
Пугачёва Т.Л., Пономаренко Е.П. УСЛОВИЯ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ	322
Радзиня А., Баширова Л.Д., Кулешова Л.А., Пономаренко Е.П., Пугачёва Т.Л. ИСКОПАЕМЫЕ КОМПЛЕКСЫ БЕНТОСНЫХ ФОРАМИНИФЕР В ОСАДКАХ ТРАНСФОРМНОГО РАЗЛОМА ЧАРЛИ-ГИББС	324
Рюмина А.А., Тищенко П.Я., Шкирникова Е.М. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ДОННЫХ ОСАДКАХ МЕЛКОВОДНЫХ БУХТ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО	326
Рязанцева К.Ю., Видищева О.Н., Большакова М.А., Богданов А.А., Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЗОВ И ОТЛОЖЕНИЙ ПОДВОДНОГО ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА КЕДР (ЮЖНАЯ КОТЛОВИНА ОЗЕРА БАЙКАЛ) ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИИ CLASS@BAIKAL-2022	328

Семиколенных Д.В., Панин А.В. НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВОЗРАСТЕ ХВАЛЫНСКОГО ПРОЛИВА	330
Сломнюк С.В., Новичкова Е.А., Козина Н.В., Баранов Б.В., Кравчишина М.Д. ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ В ЗОНЕ ПРЕДПОЛАГАЕМОГО КОНТУРИТОВОГО ДРИФТА В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ	332
Смирнов Ю.Ю., Щур Н.А., Щур А.А., Матвеева Т.В. СОЗДАНИЕ БОТА НА ЯЗЫКЕ PYTHON ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ ФИЛЬТРОГЕННЫХ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ НА ОСНОВЕ CSMHYD HYDOFF	334
Смирнова К.М. ПАЛЕООКЕАНОЛОГИЯ ГОЛОЦЕНА ПО БЕНТОСНЫМ ФОРАМИНИФЕРАМ БАРЕНЦЕВА МОРЯ В ПРОЛИВЕ СТУР-ФЬОРД (ШПИЦБЕРГЕН)	336
Соловьева М.А., Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ НА ОЗЕРЕ БАЙКАЛ	338
Юмашева А.К., Полудеткина Е.Н., Токарев М.Ю., Рыбалко А.Е., Киль А.О. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОНОВОЙ И ФОКУСИРОВАННОЙ РАЗГРУЗКИ УГЛЕВОДОРОДОВ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ	340
СЕКЦИЯ «МОРСКАЯ ГЕОФИЗИКА»	342
Башев И.А., Корнева М.С., Черных А.А. ОСОБЕННОСТИ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ШЕЛЬФА ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ	342
Буланова И.А., Пирогова А.С., Токарев М.Ю., Рыбалко А.Е., Полудеткина Е.Н. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ДЕТАЛЬНЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА УЧАСТКЕ ВБЛИЗИ О-ВА УЕДИНЕНИЯ, КАРСКОЕ МОРЕ (ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИИ TTR-21)	344
Доманюк А.В., Саломатин А.С., Юсупов В.И., Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Черных Д.В. ПУЗЫРЬКОВАЯ ЭМИССИЯ МЕТАНА В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ	346
Крылов А.А. ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И ПРОЦЕССА МАССИРОВАННОГО ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАНА ИЗ МОРСКИХ ОСАДКОВ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ	348
Новиков М.А., Крылов А.А. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ДЕЛЬТЕ Р. ЛЕНЫ	350
Пальцев И.О., Половков В.В., Кудинов А.А., Рыбалко А.Е. ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ СЕЙСМОАКУСТИКИ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ С ЦЕЛЬЮ ПОИСКА ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	352

Табырца С.Н., Жолондз А.С., Половков В.В. СОГЛАСОВАННАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ МОВ ОГТ С КОРОТКОЙ КОСОЙ 600М И ЗОНДИРОВАНИЙ МОВ-МПВ НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА ПРОФИЛЯ 1407 ЭКСПЕ- ДИЦИИ "АРКТИКА-2014"	354
СЕКЦИЯ «ХИМИЯ ОКЕАНА»	356
Алексеева Н.К., Никулина А.Л., Рыжов И.В., Корнилова Р., Смирнов Н.А., Федорова А.А., Новихин А.Е. ХАРАКТЕРИСТИКИ МОРСКОЙ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ В ЗАЛИВАХ ЗАПАД- НОГО ШПИЦБЕРГЕНА ПО ЭКСПЕДИЦИОННЫМ ДАННЫМ 2022 г.	356
Ефимова К.А., Балашова К.А., Бубнова Е.С. БИОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В РОССИЙСКИХ СЕКТОРАХ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В 2022 ГОДУ	358
Борисенко Г.В., Полухин А.А., Шармар В.Д. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОДОТОКОВ ЗАЛИВОВ ОГА, ЦИВОЛЬКИ, СЕДОВА (БЕ- РЕГ КАРСКОГО МОРЯ, НОВАЯ ЗЕМЛЯ): ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗ- МЕНЧИВОСТЬ И ВЛИЯНИЕ НА СТРУКТУРУ ВОД	360
Бородулина П.А., Федоров А.В. ДИНАМИКА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ДЕЯТЕЛЬНОМ СЛОЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧ- НОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В РАЙОНЕ Г. ГЕЛЕНДЖИКА С 2020 ПО 2022 ГГ. . .	362
Войцеховская В.В., Малахова Л.В. ХЛОРООРГАНИЧЕСКИЕ ТОКСИКАНТЫ В МОРСКОЙ ВОДЕ И ВЗВЕШЕННОМ ВЕ- ЩЕСТВЕ В ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА	364
Гурова Ю.С., Гуров К.И., Орехова Н.А. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ШЕЛЬФА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧА- СТИ ЧЕРНОГО МОРЯ	366
Двоглазова Н.В., Муратова А.А., Пономаренко Е.П., Пугачёва Т.Л., Баширова Л.Д., Кулешова Л.А. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ГЛУБОКОВОДНЫХ ПРО- ХОДАХ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ АТЛАНТИКИ ПО ДАННЫМ 2022 Г.	368
Заговенкова А.Д., Малахова Т.В., Архипкин В.С ОСОБЕННОСТИ ПУЗЫРЬКОВОГО ПЕРЕНОСА МЕТАНА В ЧЕРНОМ МОРЕ	370
Казакова У.А., Полухин А.А. СООТНОШЕНИЕ МОРСКИХ И ПРЕСНЫХ ВОД В ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ПОС КАРСКОГО МОРЯ	372
Киль А.О., Семенов П.Б., Малышев С.А., Шатрова Е.В., Яржембовский Я.Д. ОСОБЕННОСТИ ГЕОХИМИИ РАННЕГО ДИАГЕНЕЗА В ПОВЕРХНОСТНЫХ ОТЛО- ЖЕНИЯХ ОХОТСКОГО МОРЯ	374

Кодрян К.В., Кивва К.К. ПРИДОННЫЕ ВОДЫ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧУКОТСКОГО МОРЯ В АВГУСТЕ 2019 Г.	376
Корнеева А.О., Ульянова М.О. МЕТАН В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОДЫ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В ЛЕТНИЙ И ОСЕННИЙ ПЕРИОДЫ 2022 Г.	378
Крыжова К.А., Семкин П.Ю. ИЗМЕНЧИВОСТЬ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ И ПОТОКИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ЭСТУАРИИ Р. ПАРТИЗАНСКАЯ (ЗАЛ. НАХОДКА, ЯПОНСКОЕ МОРЕ)	380
Леусов А.Э., Чаркин А.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗГРУЗКИ СУБМАРИННЫХ ГРУНТОВЫХ ВОД В ВОСТОЧНО-АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ РОССИИ	382
Мальшева А.С., Радченко Ю.В. ТЕНДЕНЦИЯ ПОДКИСЛЕНИЯ ВОД АРКТИКИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 30 ЛЕТ И ОЦЕНКА ЕЁ ДИНАМИКИ НА КОНЕЦ 21-ГО СТОЛЕТИЯ	384
Мукосеев И.Н., Гурова Ю.С., Орехова Н.А. ПОТОКИ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В ЧЕРНОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ 2018 – 2019 ГГ.	386
Муратова А.А., Бубнова Е.С., Полухин А.А. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В 2022 ГОДУ	388
Мурзакова Ю.В., Беляев Н.А., Костылева А.В., Федулов В.Ю., Полухин А.А. СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЦЕНТРАЦИЙ РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО И НЕОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА КАК МАРКЕРОВ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	390
Нецветаева О.П. ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОХИМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОД В УСТЬЕВЫХ ОБЛАСТЯХ МАЛЫХ РЕК БЕЛОГО МОРЯ	392
Новиков М.О., Березина А.В., Пахомова С.В., Якушев Е.В. АНАЛИЗ БАЛАНСА КИСЛОРОДА В ВОДНОЙ ТОЛЩЕ ЧЁРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	394
Селиверстова А.М., Зуев О.А., Чульцова А.Л. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОД ЗОНЫ СМЕШЕНИЯ РЕЧНЫХ И МОРСКИХ ВОД БАСЕЙНА РЕКИ АМАЗОНКИ В ХОДЕ 52 РЕЙСА НИС «АКАДЕМИК БОРИС ПЕТРОВ»	396
Семкин П.Ю., Барабанчиков Ю.А. ОТКЛИК O_2 И pCO_2 НА ЦВЕТЕНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА В ЭВТРОФНОМ ЭСТУАРИИ РЕКИ РАЗДОЛЬНОЙ (АМУРСКИЙ ЗАЛИВ, ЯПОНСКОЕ МОРЕ) В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА	398

Слизченко Е.В., Бежин Н.А., Шибецкая Ю.Г., Козловская О.Н. ПОТОКИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$ В ЧЕРНОМ МОРЕ	399
Холмогоров А.О., Сырбу Н.С., Савельева Е.Э., Рогожина Е.А., Ревенко М.А. ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРОЛИВЕ БРАНСФИЛД (ЮЖНЫЙ ОКЕАН) ПО ДАННЫМ РЕЙСА 87 НИС «АКАДЕМИК МСТИСЛАВ КЕЛДЫШ»	401
Честнов А.И. СОЗДАНИЕ САЙТА ПО СОРТИРОВКЕ РУКОВОДЯЩИХ ДОКУМЕНТОВ В ОБЛА- СТИ ГИДРОХИМИИ	403
Фролова М.А., Шибецкая Ю.Г., Слизченко Е.В., Бежин Н.А., Тананаев И.Г. ОЦЕНКА СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ БИОДИНАМИКИ ФОСФОРА ПО КОСМО- ГЕННЫМ ИЗОТОПАМ ^{32}P , ^{33}P	405
Шибецкая Ю.Г., Козловская О.Н., Разина В.А., Бежин Н.А. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОЖИВУЩИХ ИЗОТОПОВ РАДИЯ В ЧЕРНОМ МОРЕ	407
Щербакова К.П., Космач Д.А., Черных Д.В., Шахова Н.Е., Семилетов И.П. ИСТОЧНИКИ МЕТАНА НА ШЕЛЬФЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ	409
СЕКЦИЯ «ЭКОЛОГИЯ МОРЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВА- НИЕ»	411
Артына Н.К., Григорьев Ю.С., Шашкова Т.Л., Карпов М.В. СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ ЭКСПОЗИЦИИ В ТОКСИ- ЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ БИХРОМАТА КАЛИЯ НА <i>ARTEMIA SALINA</i>	411
Ахмаева Э.Э. МОРСКОЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ В ЗАЛИВЕ ПЕТРА ВЕЛИКОГО	413
Беланов М.А., Щелканов М.Ю., Панкратов Д.В., Боярова М.Д., Цыганков В.Ю. СОДЕРЖАНИЕ ХЛОРООРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ОРГАНАХ ТУПИКА-НО- СОРОГА (<i>SEORHINCA MONOCERATA</i>) БУХТЫ БОЙСМАНА (ЯПОНСКОЕ МОРЕ)...	415
Белогурова Р.Е., Карпова Е.П. ИХТИОФАУНА КАРКИНИТСКОГО ЗАЛИВА ЧЕРНОГО МОРЯ И ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ	417
Березина А.В., Якушев Е.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПЕРЕНОС МИКРОПЛАСТИКА В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ	419
Боровкова А.Д., Боярова М.Д., Цыганков В.Ю. ХЛОРИРОВАННЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ В МОЛЛЮСКАХ СЕМЕЙСТВА MUTILIDAE ЗАЛИВА НАХОДКА (ЯПОНСКОЕ МОРЕ)	421
Бочерикова И.Ю., Чубаренко И.П., Лобчук О.И. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЧАСТИЦАМИ МИКРОПЛАСТИКА ЛЬДОВ КУРШСКОГО ЗАЛИВА (БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ) И БУХТЫ НОВИК (ЯПОНСКОЕ МОРЕ	423

Бударова В.Ю., Тихонова Е.А., Бурдиян Н.В., Дорошенко Ю.В. ОТДЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО СООБЩЕСТВА ВОД СЕ- ВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ	425
Голубева Е.А., Ершова А.А. ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОМУСОРА НА ПОБЕРЕЖЬЯХ ФИНСКОГО ЗАЛИВА И НЕВСКОЙ ГУБЫ	428
Двоеглазова Н.В. ВОЗМОЖНОЕ БЛОКИРОВАНИЕ ВОДОЗАБОРОВ Г. КАЛИНИНГРАДА НА РЕКЕ ПРЕГОЛЕ ИНТРУЗИЯМИ ВОД С ПОВЫШЕННОЙ СОЛЁНОСТЬЮ	430
Дьячковский Р.А. ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ИН- ТЕГРАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ АКВАТОРИЙ	433
Жданов И.А., Пахомова С.В., Березина А.В., Якушев Е.В. ПЕРЕНОС МИКРОПЛАСТИКА РЕКАМИ ЕВРАЗИЙСКОЙ АРКТИКИ	435
Жондарева Я.Д. КУЛЬТИВИРОВАНИЕ МИКРОВОДОРОСЛИ <i>PHAEODACTYLUM TRICORNUTUM</i> ВОHLIN (1897) КАК СПОСОБ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ САХАР- НОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ (МЕЛАССЫ)	437
Калинина Д.А., Александров С.В. ЭВТРОФИРОВАНИЕ И КАЧЕСТВО ВОД ПО ХЛОРОФИЛЛУ В РАЙОНЕ ЭКСПЛУ- АТАЦИИ ОБЪЕКТОВ КАЛИНИНГРАДСКОГО ПХГ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ БАЛ- ТИЙСКОГО МОРЯ	440
Клименко С.К. ПОИСК И ОБНАРУЖЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ В ЧЕРНОМ МОРЕ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ С ПО- СЛЕДУЮЩЕЙ ВЕРИФИКАЦИЕЙ	442
Кривошлык П.Н., Чубаренко И.П. ДАННЫЕ О СОДЕРЖАНИИ МИКРОПЛАСТИКА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ БАЛ- ТИЙСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ РЕЙСА АНС39	444
Кузнецов Р.Е., Дроздов В.В. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОМЫСЛОВОМ РЫБО- ЛОВСТВЕ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ	446
Кузьмина А.С., Ершова А.А. ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ БАРЕН- ЦЕВА МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИИ "АРКТИЧЕСКИЙ ПЛАВУЧИЙ УНИ- ВЕРСИТЕТ 2021"	448
Лапенков А.Е., Зарипова К.М., Гузева А.В. ПОДВИЖНЫЙ ФОСФОР В ДОННЫХ ОСАДКАХ ФОРЕЛЕВОГО ХОЗЯЙСТВА (ЯК- КИМВААРСКИЙ ЗАЛИВ)	450

Любимов И.В., Колючкина Г.А. ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МАКРОЗООБЕНТОСА БИОЦЕНОЗА <i>ZOSTERA MARINA</i> РАЗНЫХ ШИРОТНЫХ ЗОН	452
Мирошниченко О.Н., Сидоров И.Г., Параскив А.А. ШИРОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ 137CS В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 2020 Г.	454
Носкова Т.А., Александров С.В. ЭВТРОФИРОВАНИЕ И КАЧЕСТВО ВОД КАЛИНИНГРАДСКОГО МОРСКОГО КАНАЛА И ПРИЛЕГАЮЩИХ ВОД КАЛИНИНГРАДСКОГО ЗАЛИВА ПО КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА В 2022 Г.	456
Параскив А.А., Терещенко Н.Н., Проскурнин В.Ю., Чужикова-Проскурнина О.Д., Вахрушев М.О. ПОТОКИ МИГРАЦИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОИЗОТОПОВ ПЛУТОНИЯ В ПРИБРЕЖНЫХ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМАХ НА ПРИМЕРЕ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ	458
Погожева М.П., Гонзалес-Фернандес Д., Третьяк И.П., Котельникова Ю., Мачидадзе Н., Билашвилли К., Ханке Г. КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЁННОСТИ МОРСКИМ МУСОРОМ ЧЕРНОГО МОРЯ	460
Поливанова Т.К. СВЯЗЬ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАВАЮЩЕГО МИКРОПЛАСТИКА В КАРСКОМ МОРЕ С ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ	462
Попов Г.Е. ПОЛИТИКА ФРАНЦИИ В ОБЛАСТИ МОРСКОЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	464
Санин А.Ю. К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ РЕКРЕАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИМОРСКИХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ	467
Семенова Е.Е., Хаймина О.В. РАЗРАБОТКА БАЗОВОГО НАБОРА ИНДИКАТОРОВ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН	470
Татаренко Ю.А., Хаймина О.В., Прокофьев П.А., Родькин М.М., Бугров Л.Ю. ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ МАРИКУЛЬТУРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОД ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ	472
Ткаченко Ю.С., Тихонова Е.А., Бударова В.Ю. КАЧЕСТВЕННАЯ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА АЛИФАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ВОДЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ	474
Филиппова Т.А., Васечкина Е.Ф. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА БИОПРОДУКТИВНОСТЬ ДОННЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ КРЫМА	476

СЕКЦИЯ «ФИЗИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКЕАНА»	479
Аглова Е.А., Глуховец Д.И., Гольдин Ю.А. ОЦЕНКА БИООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВОД БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ ОСЕНЬЮ 2022 Г. ПО ДАННЫМ СУДОВОГО ПРОТОЧНОГО КОМПЛЕКСА	479
Василенко Н.В., Кубряков А.А., Алескерова А.А., Станичный С.В., Медведева А.В. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В ВОДАХ АЗОВСКО- ГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ	481
Глуховец Д.И., Аглова Е.А., Артемьев В.А., Глитко О.В., Глухов В.А., Дерягин Д.Н., Клименко С.К., Павлова М.А., Салинг И.В. РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРООПТИЧЕСКИХ РАБОТ, ВЫПОЛНЕННЫХ В БАРЕНЦЕВОМ И КАРСКОМ МОРЯХ В СЕНТЯБРЕ 2022 Г.	483
Зенкова П.Н., Чернов Д.Г., Аршинов М.Ю., Круглинский И.А. ОПТИЧЕСКИЕ И МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРОПОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ НАД АРКТИЧЕСКИМИ МОРЯМИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ С БОРТА САМОЛЕТА-ЛАБОРАТОРИИ в 2020 и 2022гг.	485
Калмыкова Д.В., Чурилова Т.Я., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А., Скороход Е.Ю. ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ БИООПТИЧЕСКИХ ПОКА- ЗАТЕЛЕЙ ПРИБРЕЖНЫХ ВОД КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА (ЛЕТО 2022 ГОД) .	487
Кубряков А.А., Лишаев П.Н., Кубрякова Е.А., Мизюк А.И. ВЛИЯНИЕ МЕЗОМАСШТАБНОЙ ДИНАМИКИ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕ- РИСТИКИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕМО-ВFM И ДАННЫМ БУЕВ АРГО	489
Кузьмина С.К., Лобанова П.В. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ АЛГОРИТМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЧИСТОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ПЛАНКТОНА (СООБЩЕСТВА) В ВОДАХ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕ- АНА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ	491
Мухамадиева А.Р., Фролова Н.С. ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННОГО И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИ- ТОПЛАНКТОНА БАРЕНЦЕВА МОРЯ	493
Назирова К.Р. ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА И МУТНОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ В ПРИУСТЬЕВЫХ ЗОНАХ МОРЕЙ НА ОСНОВЕ СИНХРОННЫХ СПУТНИКОВЫХ И НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	495
Павлова М.А., Глуховец Д.И. АНАЛИЗ ДАННЫХ О КОЭФФИЦИЕНТЕ ЯРКОСТИ МОРЯ И БИООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ, ИЗМЕРЕННЫХ КОНТАКТНЫМИ И ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ В КАРСКОМ МОРЕ ОСЕНЬЮ 2022 Г.	497

Позднякова В.В., Кустикова М.А. ОЦЕНКА ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ В МОРСКОЙ ВОДЕ ДЛЯ ЗАДАЧ ЛИДАРНОГО МОНИТОРИНГА	499
Скороход Е.Ю., Чурилова Т.Я., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А., Землянская Е.А., Бучельников А.С. РАЗЛИЧИЯ МЕЖДУ СТАНДАРТНЫМИ ПРОДУКТАМИ NASA И EUMETSAT ДЛЯ ДАННЫХ SENTINEL-3 A/B OLCI L2	501
Шоларь С.А., Степанова О.А. СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ МИКРОВОДОРОСЛИ TETRASELMIS VIRIDIS, ИНФИЦИРОВАННОЙ АЛЬГОВИРУСОМ	503
Юшманова А.В., Шеберстов С.В., Глуховец Д.И. УЧЕТ ПРОСЛОЙКИ ВОЗДУХА МЕЖДУ КВАРЦЕМ И ФЛУОРИЛОНОМ В ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СФЕРЕ	505
СЕКЦИЯ «ОКЕАНОЛОГИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ» . .	507
Бабаев Б.Г., Новичков Д.Е., Седов А.Н. ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОГО ПОИСКА ДЕФЕКТОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ	507
Байдаков Г.А., Русаков Н.С., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. ПОСТРОЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ОРТОГОНАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПО ДАННЫМ РАССЕЯНИЯ СВЧ СИГНАЛА НА ОБРУШЕНИЯХ ВЕТРОВЫХ ВОЛН	509
Вышкваркова Е.В., Греков А.Н., Трусевич В.В., Маврин А.С. ПРОГНОЗНЫЕ МОДЕЛИ АКТИВНОСТИ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ АЛГОРИТМАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	511
Глухов В.А., Глитко О.В., Гольдин Ю.А., Родионов М.А. РЕЗУЛЬТАТЫ СУДОВОЙ ЛИДАРНОЙ СЪЕМКИ В КАРСКОМ МОРЕ	513
Дерновский В.Л., Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Глитко О.В., Родионов М.А. СПОСОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ЛИДАРНЫХ ЭХО-СИГНАЛОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ТОЛЩЕ МОРСКОЙ ВОДЫ	515
Иванов М.П., Долгих С.Г. ВЕРИФИКАЦИЯ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ВАРИАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ГИДРОСФЕРЫ И ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЗОНДА	517
Касаткин А.Я., Криницкий М.А., Гулев С.К. ФИЛЬТРАЦИЯ ВЫБРОСОВ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	518
Полетаев Д.А., Соколенко Б.В. ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ РЕЗОНАНСНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ЭКСПРЕСС ОЦЕНКИ СОЛЕННОСТИ ВОДЫ	520

Пономаренко А.А., Разумов Д.Д., Салин М.Б. ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКЕАНА	522
Ржепка Т.П., Наумова Е.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОЛОГИИ ЗИМНЕГО ЗООПЛАНКТОНА ОЗЕРА БАЙКАЛ С ИС- ПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ	524
Ташбаев Д.У., Садиев С.А., Иванова Т.С., Иванов М.В., Лайус Д.Л. СУТОЧНЫЕ МИГРАЦИИ ТРЁХИГЛОЙ КОЛЮШКИ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ КАН- ДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ: АНАЛИЗ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ С ПО- МОЩЬЮ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	526
Тышко А.А., Шатравин А.В., Криницкий М.А. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ БЕЛУХ И АФАЛИН	528

ВЗМУЧИВАНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА МЕЛКОВОДНЫХ УЧАСТКАХ
МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

Осадчиев А.А.^{1,2,3}, Адамовская П.О.^{1,4}, Мысленков С.А.^{1,5},
Дударев О.В.^{2,6} и Семилетов И.П.^{2,6}

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

² Томский государственный университет, г. Томск

³ Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

⁴ Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

⁵ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

⁶ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: донные отложения, подводная мерзлота, взмучивание донных отложений, ветровое воздействие, волновое воздействие, прибрежный апвеллинг, море Лаптевых, Северный Ледовитый океан.

В последние десятилетия в Арктике происходят наиболее существенные климатические изменения по сравнению с другими районами Земли. Среди их важнейших проявлений – увеличение температуры воздуха и сокращение площади морского льда в теплый период года. Происходящее в настоящее время потепление в Арктике также интенсифицирует деградацию криолитозоны берегов и морского дна в шельфовых акваториях [1]. Особенно явно процесс деградации криолитозоны проявляется в море Лаптевых, на мелководном шельфе которого значительные площади относятся к подводной мерзлоте [2].

Основными источниками взвешенных веществ в море Лаптевых являются речной сток и береговая эрозия, чему было посвящено большое количество исследований. Наряду с ними определенную роль в поступлении и перераспределении взвеси в море играет взмучивание донных осадков на мелководных акваториях в результате термоабразии подводной мерзлоты, однако этот процесс до сих пор остается малоизученным. Прогнозируемая интенсификация деградации подводной мерзлоты и увеличение скорости поступления взвешенных веществ в водную толщу в результате донного взмучивания делают изучение этого процесса в море Лаптевых особенно актуальным.

Данная работа посвящена исследованию взмучивания донных отложений в море Лаптевых в районе Васильевско-Семеновского мелководья (ВС) вблизи острова Столбовой, где волновая турбулентность периодически достигает морского дна и вызывает эрозию субаквальной мерзлоты. Взмученная взвесь поднимается до поверхностного слоя моря, существенно увеличивая его мутность, что часто регистрируется на оптических спутниковых снимках. Анализ оптических спутниковых снимков MODIS Terra/Aqua с пространственным разрешением в 250 метров и суточной временной дискретностью за 2000-2021 годы позволил оценить пространственные характеристики и временную изменчивость области повышенной мутности в акватории ВС. Далее была изучена зависимость между площадью области повышенной мутности и характеристиками ветрового и волнового воздействия, полученных по данным реанализов NCEP/CFR/CFRv2 с пространственным разрешением в 0.2-0.3° и временной дискретностью в 1 час и спектральной волновой модели WAVEWATCH III [3].

Наиболее значимой оказалась зависимость площади взмучивания в акватории ВС от высот волн, осредненных за 15 дней, с коэффициентом корреляции в 0.71. Используя полученную линейную зависимость между средней высотой волны (H) и площадью области взмучивания (S), $S = 228 \cdot H - 84$, были рассчитаны значения этой площади для каждого дня безледного периода за 2000-2021 год по данным волнового реанализа. На основе прямых измерений концентрации взвешенных веществ, проведенных в период взмучивания в сентябре 2002 года [4], были получены численные оценки потока взвешенного вещества в результате донного взмучивания в море Лаптевых в 2000-2021 годах. Было установлено, что за безледный период в акватории ВС происходит в среднем по 5 отдельных случаев взмучивания, в результате чего каждый год в море Лаптевых поступает в среднем 11 тонн взвешенного вещества. Межгодовая изменчивость массы взвешенного вещества за рассматриваемый период составляет 17 тонн. В связи с происходящим потеплением и сокращением площади льда в море Лаптевых был выявлен положительный межгодовой тренд данной величины.

Полученные оценки показывают, что объем взвешенного вещества, поступающий в морскую воду с ВС, составляет незначительную часть в сравнении с поступлением взвешенного вещества со стоком рек и в результате термоабразии морских берегов. Тем не менее, рассматриваемый процесс может быть важным источником биогенов в открытой части моря Лаптевых [5]. Полученные результаты являются важным шагом к улучшению понимания как процесса деградации подводной мерзлоты, так и потоков взвешенного вещества в море Лаптевых.

Данная работа была профинансирована Программой развития Томского государственного университета (Федеральная программа "Приоритет-2030").

Список литературы

- 1) Anatoly V. Gavrilov, Elena I. Pizhankova. Dynamics of permafrost in the coastal zone of eastern-asian sector of the arctic // *Geography, Environment, Sustainability* №1. 2018. P. 20-37
- 2) Романовский Н.Н., Тумской В.Е. Ретроспективный подход к оценке современного распространения и строения шельфовой криолитозоны Восточной Арктики // *Криосфера Земли* №1. 2011. С. 3–14
- 3) Мысленков С.А. Особенности моделирования ветрового волнения в море Лаптевых, Чукотском и Восточно-Сибирском морях // *Труды XI Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2022)». Т. II (IV). 2022. С. 92–97*
- 4) Дударев О.В., Чаркин А.Н., Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Сергиенко В.И., Пипко И.И., Пугач С.П., Черных Д.В. Особенности современного морфолитогенеза на шельфе моря Лаптевых: Семеновское мелководье («Земля Васема») // *Доклады Академии наук* № 5, Т. 462. 2015. С. 223-229
- 5) Костылева А.В., Полухин А.А., Степанова С.В. Особенности гидрохимической структуры зоны смешения вод реки Лены и моря Лаптевых в осенний период // *Океанология* № 6, Т. 60. 2020. С. 843-850

ФРОНТАЛЬНЫЕ ЗОНЫ В ДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РАЙОНАХ МИРОВОГО ОКЕАНА

Ахтямова А.Ф.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: фронтальные зоны, реанализ GLORYS12V1, мезомасштабные вихри, апвеллинг, META.

Фронтальные зоны (ФЗ) образуются в районах взаимодействия вод, имеющих разное происхождение и существенно различающихся по своим характеристикам, наиболее яркой особенностью, выделяющей фронтальные зоны среди прочих явлений в океане, является резкий перепад (горизонтальный градиент) одного или нескольких гидрофизических параметров на конкретном участке моря или океана [1], [2]. Известно, что из-за неустойчивости фронтальных зон образуются мезомасштабные вихри. Они вносят весомый вклад в климат Европы, перенося потоки тепла на большие расстояния [3].

Фронтальные зоны исследовать актуально в связи с их высокой биологической продуктивностью, важным влиянием крупномасштабных фронтов на погоду и климат, а также наличием высокоскоростных струйных течений. Цель данной работы – детектирование фронтальных зон в Норвежском море и вдоль юго-западного побережья Африки (районе Бенгельского апвеллинга), и последующее сравнение мезомасштабной вихревой динамики в области выделенных фронтальных зон.

В исследовании были использованы данные по температуре, солености и уровню морской поверхности с 1993 по 2020 г., взятые из глобального океанического реанализа высокого разрешения GLORYS12V1 (1/12°). Также были использованы данные по мезомасштабным вихрям продукта «MESOSCALE EDDY TRAJECTORY ATLAS PRODUCT META 3.2 DT».

Детектирование фронтальных зон основывалось на расчете горизонтальных градиентов [4]. Для выделенных областей фронтальных зон (районы, где градиент температуры >0.02 °C/км, градиент солености >0.01 psu/км, а градиент уровня морской поверхности >0.002 м/км) оценивались характеристики и встречаемость вихревых структур.

В Норвежском море были детектированы следующие ФЗ: Исландско-Фарерская, Восточно-Исландского течения, Прибрежная, Арктическая (Ян-Майенская) и Западного Шпицбергена. Анализ мезомасштабных вихрей, сгенерированных в фронтальных зонах, показал следующее: антициклонические (АЦ) и циклонические (Ц) вихри способны перемещаться на сотни километров от места своего зарождения, диссипируя в конечном итоге в Лофотенской и Норвежской котловинах. Наибольшее количество вихрей обоих типов зафиксировано в Ян-Майенской ФЗ и ФЗ Западного Шпицбергена. Количество Ц и АЦ вихрей способно достигать в них 200 вихрей на ячейку ($2^\circ \times 1^\circ$ по долготе и широте), что свидетельствует о высокой интенсивности вихреобразования в данных областях. Причем, если часть вихрей Прибрежной и Исландско-Фарерской ФЗ движется на север, то часть вихрей Ян-Майенской ФЗ смещается на юг, двигаясь в противоположном направлении к осредненной по времени локальной циркуляции. Короткоживущие вихри (регистрируемые менее 10 дней) намного реже покидают районы ФЗ, перемещаясь в основном лишь в их границах.

Для фронтальной зоны бенгельского апвеллинга вспомогательным полем для детектирования ФЗ послужили данные по хлорофиллу для уточнения границ рассматриваемого региона. Был выделен обширный район ФЗ апвеллинга с 10° ю.ш. до 34° ю.ш., с двумя пиками в районе 15° ю.ш. и 25° ю.ш. Значения градиентов в поле солености и температуры в среднем выше аналогичных в Норвежском море (за исключением Прибрежной ФЗ). Вихревая динамика в данном районе более интенсивна, чем в Норвежском море: количество долгоживущих Ц и АЦ вихрей способно

достигать 260 вихрей на ячейку ($2^{\circ} \times 1^{\circ}$ по долготе и широте), в то время как короткоживущие достигают 80 вихрей на ячейку. Вихри, детектируемые в ФЗ Бенгельского апвеллинга, преодолевают большие расстояния до момента своей диссипации, чем детектируемые в Норвежском море.

Таким образом, в работе были показаны различия характеристик фронтальных зон в Норвежском море и районе Бенгельского апвеллинга, в последней из которых наблюдалось более интенсивное развитие вихревой динамики.

Список литературы

- 1) Федоров К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов // Ленинград, Гидрометеоиздат. – 1983. – 296 с.
- 2) Грузинов В.М. Гидрология фронтальных зон Мирового океана // Ленинград, Гидрометеоиздат. – 1986. – 272 с.
- 3) Belonenko T., Zinchenko V., Gordeeva S., Raj R. Evaluation of heat and salt transports by mesoscale eddies in the Lofoten Basin // Russ. J. Earth Sci. (20). 2020. ES6011. doi: 10.2205/2020ES000720
- 4) Ожигин В.К., Ившин В. А., Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Анциферов М.Ю. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость // Мурманск: ПИПРО. – 2016. – 216 с.

МАЛЫЕ ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ КАК ИНДИКАТОР СУБМЕЗОМАСШТАБНОЙ ДИНАМИКИ В БОЛЬШИХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ОЗЕРАХ ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ В БЕЗЛЕДНЫЙ ПЕРИОД 2021 И 2022 ГГ.

Благодатских Е.А.¹, Атаджанова О.А.², Зимин А.В.²

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: субмезомасштабные вихри, радиолокационные изображения, Ладожское озеро, Онежское озеро.

Спектр наблюдающихся в озерах вихревых движений широк и простирается от мелкомасштабных вихрей, приводящих к диссипации энергии, до крупномасштабных вихрей – циркуляции, охватывающей все озеро [1]. Они играют решающую роль в горизонтальном и вертикальном распределении биологических, химических и физических параметров, которые могут влиять на качество воды [2].

При всем богатстве динамических структур в озерах сведения о вихрях размером порядка единиц километров и со временем жизни от часов до суток носят отрывочный характер в связи с трудностью их наблюдения из-за малого времени жизни и математического описания, т.к. они не полностью описываются положениями квазигеострофической теории и в тоже время не являются в полной мере изотропно трехмерными, негидростатическим [3]. Вихри такого масштаба относятся к субмезомасштабу.

По данным отрывочных наблюдений субмезомасштабные вихри отмечались ранее в Ладожском и Онежском озерах [4,5]. Например, на приведенном в [4] изображении в видимом диапазоне четко прорисовываются несколько проявлений вихревых структур в прибрежной части Ладожского озера (вблизи истока р. Нева).

В рамках данной работы проводится оценка встречаемости и изменчивости характеристики субмезомасштабных структур на акватории Ладожского и Онежского озер на основе большого массива радиолокационных изображений.

В качестве исходных данных использовались радиолокационные изображения (далее – РЛИ) Sentinel-1A/B в режимах съёмки IW (Interferometric Wide) и EW (Extra Wide) и с разрешением 20 и 90 м соответственно в безледные периоды с 1 мая по 31 октября 2021 и 2022 гг. Изображения были получены с сайта Alaska Satellite Facility. Для предварительного анализа использовалось около 250 РЛИ за два года из почти 500 доступных за этот период для акваторий Ладожского и Онежского озер. Анализ всех доступных РЛИ будет представлен в докладе.

Поверхностные проявления вихрей детектировались на РЛИ по методике [6]. Определялись следующие характеристики положение центра, диаметр и тип вихря (антициклонический, циклонический).

За исследуемый период по предварительному анализу на акваториях двух озер было суммарно зарегистрировано 80 поверхностных проявлений вихревых структур, преимущественно отмечались отдельные проявления, реже - дипольные. Большинство из них, около 90%, приходится на 2021 год.

В Ладожском озере вихри отмечались преимущественно в центральной и восточной частях водоема. В 2021 году преобладали вихри циклонического вида (80%), со средним диаметром 2 км. Антициклонические вихри составляют 20% от общего числа, средний диаметр – 1.7 км. В 2022 г. зафиксировано два циклонических вихря со средним диаметром 2.5 км и один вихрь антициклонический диаметром 1.8 км.

В Онежском озере вихри отмечаются в восточной части, между островом Большой Клименецкий и западным берегом, а также восточнее Петрозаводской губы, 3 вихря отмечено в Повенецком заливе. В 2021 году циклонических вихрей было 75% со средним диаметром 3 км, антициклонических - 25% со средним диаметром 3.4 км. В 2022 отмечено два вихря циклонических со средним диаметром 2.9 км. и четыре антициклонических со средним диаметром 7.2 км.

Анализ РЛИ показал, что в Ладожском и Онежском озере субмезомасштабные вихри не редкое явление, однако вероятность их обнаружения резко снижается при уменьшении частоты покрытия снимками исследуемых акваторий.

Исследование выполнено в рамках государственного задания №FMWE-2021-0014.

Список литературы

- 1) Показеев К.В., Филатов Н.Н. Гидрофизика и экология озер. Том.1. Гидрофизика М. МГУ. Физический факультет. 2002., 276 с.
- 2) Микаэлян А.С., Зацепин А.Г., Кубряков А.А. Воздействие мезомасштабной вихревой динамики на биопродуктивность морских экосистем (обзор) // Морской гидрофизический журнал. 2020. №6 (216). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozdeystvie-mezomasshtabnoy-vihrevoy-dinamiki-na-bioproduktivnost-morskih-ekosistem-obzor>
- 3) Thomas L.N., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics // Ocean Modeling in an Eddying Regime / Eds. M.W. Hecht, H. Hasumi. Geophys. Monogr. Ser. 2008. V. 177. P. 17–38. doi: 10.1029/177GM04
- 4) Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас / ред. В.А. Румянцев. — СПб.: Нестор-История, 2015.— 200с.
- 5) Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 151 с
- 6) Субмезомасштабные вихри в Белом море по данным спутниковых радиолокационных измерений / Зимин А.В., Атаджанова О.А., Романенков Д.А., Козлов И. Е. [и др.] – Исследование Земли из космоса. – 2016. – № 1 – 2. – С. 129 – 135.

ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ И ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВОДНЫХ МАСС

В ЖЕЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ

Витинг К.Б.¹, Осадчиев А.А.^{1,2}, Демешко Д.М.¹

¹Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный

²Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: теплосодержание, желоб Святой Анны, атлантические водные массы, циркуляция.

Поступление теплых вод атлантического происхождения в Западную Арктику считается одним из механизмов формирования положительной обратной связи при происходящем потеплении климата в Арктике. К тому же, эти воды служат потенциальным источником биогенов для шельфовой зоны арктических морей России. Поэтому изучению циркуляции и межгодовой изменчивости атлантических вод в последнее время уделяется много внимания. Исходный поток атлантических вод разделяется в районе острова Шпицберген на две ветви. Одна из них обтекает остров Шпицберген с юга и идет через Баренцево море, попутно значительно охлаждаясь (Баренцевоморская водная масса, БВМ). Другая ветвь проходит к северу от Шпицбергена через пролив Фрама и идет вдоль континентального склона, оставаясь теплой (Фрамовская водная масса, ФВМ). Часть потока, прошедшего через пролив Фрама, и весь поток, прошедший через Баренцево море, встречаются вновь в северной части Карского моря в желобе Святой Анны. Фрамовская ветвь затекает в желоб вдоль западного склона, разворачивается в центральной части желоба и вытекает вдоль восточного склона. Баренцевоморская ветвь течет по дну вдоль восточного склона желоба, прижимаясь к нему из-за действия силы Кориолиса [1, 2]. Считается, что эти потоки достаточно сильно взаимодействуют, что сказывается на характеристиках воды, которая далее распространяется в восточную и центральную части Северного Ледовитого океана.

Подробные STD-съемки в желобе Святой Анны были проведены в ходе 58 рейса НИС «Академик Иоффе» (по программе Плавающий университет ИО РАН и МФТИ, АИ-58) и 86 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» (АМК-86) в августе и октябре 2021 года соответственно. Для изучения межгодовой изменчивости водных масс в желобе Святой Анны в работе анализировались данные STD-зондирований июля 1996 года экспедиции ACSYS (ACSYS 96), а также августа 2009 года, сентября 2013 года и сентября 2015 года экспедиций NABOS. Данные экспедиций ACSYS 96 и NABOS доступны в открытых источниках [4].

По этим данным были построены профили распределения температуры и солености на одиннадцати разрезах поперек желоба Святой Анны и одном разрезе вдоль желоба в северной его части, что позволило уточнить региональную схему течений. Также для каждого разреза было рассчитано теплосодержание ветвей ФВМ и БВМ [3]. Оказалось, что в северной части желоба помимо теплых ядер входящего и выходящего потоков ФВМ на западе и востоке соответственно присутствует третье ядро, расположенное между ними. Анализ расположения ядер входящего и выходящего потоков ФВМ на разрезах вдоль всего желоба показал, что стремящийся на север выходящий поток ФВМ разделяется на два потока. Меньший из них идет на северо-восток и выходит из желоба на континентальный склон, а больший поток разворачивается в северной части желоба и сливается с входящим потоком ФВМ, тем самым образуя циклонический круговорот. Наличие круговорота ФВМ в желобе Святой Анны было подтверждено расчетом геострофических течений, показавшим северное направление течения обоих восточных ядер ФВМ в северной части желоба, и данными синхронной спутниковой абсолютной динамической топографии, которая при слабом ветре и отсутствии льда продемонстрировала наличие стационарно существующего круговорота ФВМ [5].

Анализ теплосодержания указывает на значительные сезонную и межгодовую изменчивость свойств ФВМ и БВМ в желобе.

- Август — октябрь 2021 г.: входящий поток ФВМ: -0.26 ГДж м^{-2} , северный разворот ФВМ: $+1.17 \text{ ГДж м}^{-2}$, БВМ: -0.35 ГДж м^{-2}
- Июль 1996 г. — август 2021 г.: входящий поток ФВМ: $+1.53 \text{ ГДж м}^{-2}$, выходящий поток ФВМ: $+2.64 \text{ ГДж м}^{-2}$, БВМ: -0.09 ГДж м^{-2}
- Август 2009 г. — август 2021 г. (центральная часть): южный разворот ФВМ: -0.91 ГДж м^{-2} , БВМ: $+0.14 \text{ ГДж м}^{-2}$
- Август 2009 г. — август 2021 г. (северная часть): выходящий поток ФВМ: $+0.09 \text{ ГДж м}^{-2}$, БВМ: $+0.34 \text{ ГДж м}^{-2}$
- Значения теплосодержания в северной части желоба в августе 2021 г. (для сравнения): входящий поток ФВМ: 7.01 ГДж м^{-2} , северный разворот ФВМ: 5.51 ГДж м^{-2} , выходящий поток ФВМ: 3.38 ГДж м^{-2} , БВМ: 0.98 ГДж м^{-2}

Таким образом, благодаря подробной СТД-съемке в желобе Святой Анны удалось уточнить представление о циркуляции ФВМ в желобе и ее взаимодействии с БВМ. Выяснилось, что только небольшая часть ФВМ покидает желоб и движется дальше вдоль материкового склона в восточную и центральную части арктического бассейна, а большая часть ФВМ рециркулирует в пределах желоба. Как показал анализ теплосодержания, сезонная изменчивость для БВМ и ФВМ является достаточно высокой, приблизительно одного порядка с межгодовой. Взаимодействие и теплообмен между ФВМ и БВМ в пределах желоба выражены слабо.

Часть работы выполнена в рамках программы Плавающие университеты при поддержке Министерства науки и высшего образования и Фонда целевого капитала МФТИ.

Список литературы

- 1) Lien V.S. and Trofimov A.G. Formation of Barents Sea Branch Water in the north-eastern Barents Sea // Polar Research. — 2013. — Vol. 32, № 1. — DOI 10.3402/polar.v32i0.18905
- 2) Dmitrenko I.A. [et al.] Atlantic water flow into the Arctic Ocean through the St. Anna Trough in the northern Kara Sea // J. Geophys. Res. Oceans. — 2015. — Vol. 120, № 7. — P. 5158–5178. — DOI 10.1002/2015JC010804
- 3) Polyakov I.V. [et al.] Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // Science. — 2017. — Vol. 356, № 6335. — P. 285–291. — DOI 10.1126/science.aai8204
- 4) Schauer U., Rohardt G. Physical oceanography during POLARSTERN cruise ARK-XII // PANGAEA. — 1998. — DOI 10.1594/PANGAEA.742617
- 5) Osadchiv A.A. [et.al.] Structure and Circulation of Atlantic Water Masses in the St. Anna Trough in the Kara Sea // Frontiers in Marine Science. — 2022. — Vol. 9. — DOI 10.3389/fmars.2022.915674

СЕЗОННЫЕ И МНОГОЛЕТНИЕ ТРЕНДЫ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЯХ ЧЁРНОГО МОРЯ

Гиппиус Ф.Н.¹, Мысленков С.А.^{1,2,3}

¹Московский государственный университет, г. Москва

²Институт океанологии РАН, г. Москва

³ФГБУ «Гидрометцентр России», г. Москва

Ключевые слова: Чёрное море, ветровые волны, численное моделирование, прибрежные акватории, модель SWAN, реанализ NCEP CFSR, многолетняя изменчивость.

Прибрежные акватории Чёрного моря уникальны с природной и социально-экономической точек зрения. На побережье и в прибрежной морской полосе расположены специфические ландшафты, некоторые из которых находятся под защитой в составе ООПТ. На берегу расположены промышленные и инфраструктурные сооружения, в том числе порты и подводные трубопроводы. Ветровые волны влияют как на природные, так и на техногенные объекты – например, вызывают водльбереговые переносы наносов, а также повреждают инженерные сооружения. Знание режимных и экстремальных параметров ветровых волн, а также оценки этих параметров в будущем климате важны при проектировании вновь возводимых объектов. Этими соображениями обусловлена актуальность исследований ветровых волн в прибрежных акваториях Чёрного моря. Цель нашего исследования – дать характеристику сезонной и многолетней изменчивости параметров ветрового волнения в прибрежных акваториях Чёрного моря, а также установить наличие или отсутствие значимых трендов в многолетних рядах этих параметров.

Параметры ветровых волн на акватории Чёрного моря рассчитаны с применением численной спектральной волновой модели третьего поколения SWAN [1, 2]. В ней объединены наиболее полные параметризации возникновения, диссипации и взаимодействия волн на «глубокой воде», а также характерные для мелководных акватории процессы донного трения и обрушения волн. В качестве атмосферного форсинга использовались данные о ветре из реанализов NCEP CFSR [3] и NCEP CFSv2 [4] с 1979 по 2018 гг. Создана оригинальная неструктурная расчётная сетка, пространственное разрешение которой зависит от глубины моря. Расстояние между узлами сетки изменяется от 10 км в открытых частях моря до 25 м в прибрежных акваториях. Валидация результатов моделирования выполнена на основе данных, полученных с помощью волномерного буя и спутниковой альтиметрии. Для оценки многолетней изменчивости параметров ветрового волнения в прибрежных акваториях анализируются ряды данных для 12 точек, равномерно расположенных вдоль берегов Чёрного моря; эти же материалы были ранее использованы для оценки статистики ветровых волн и многолетней изменчивости их максимумов [5, 6].

В нынешнем исследовании первостепенное внимание уделено сезонной изменчивости многолетних трендов в высотах значительных волн. Из исходных результатов моделирования были выделены ряды для каждого месяца. По ним были вычислены ежемесячные средние и максимальные высоты значительных волн. Затем были сформированы многолетние ряды этих показателей для каждого месяца. Для каждого из таких рядов с помощью метода наименьших квадратов определялся линейный тренд, а также с помощью теста Манна-Кендалла определялась значимость тренда на уровнях значимости 0.1, 0.05 и 0.01. Таким образом, для средних и максимальных высот значительных волн было определено по 144 параметра тренда и их значимости.

Для максимальных высот значительных волн в 59 % случаев зафиксирован положительный тренд, в 41 % – отрицательный. При этом в 4.9 % случаев тренды оказались значимыми на уровне 0.01, в 6.3 % – на уровне 0.05 и в 4.9 % – на уровне 0.1. Наиболее выраженный значимый отрицательный тренд зафиксирован в Варне (западное побережье Чёрного моря) в ноябре; он составляет

-0.03 м/год. Напротив, максимальный положительный тренд зафиксирован в марте в Зонгулдаке (южное побережье), он составляет 0.03 м/год.

В случае средних высот значительных волн доля положительных и отрицательных трендов также составляет 59 и 41 % соответственно. Значимые тренды на уровне 0.01 отмечены в 6.9 % случаев, на уровне 0.05 – в 11.1 % случаев, на уровне 0.1 – в 10.4 % случаев. Значимый убывающий тренд наиболее выражен в Кацивели (южное побережье Крымского полуострова) в декабре, он составляет 0.008 м/год. В свою очередь наиболее выраженный значимый положительный тренд зафиксирован в Зонгулдаке в марте, что совпадает с максимальными высотами значительных волн; этот тренд составляет 0.007 м/год.

Список литературы

- 1) Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation // *J. Geophys. Res. Ocean.* 1999. V. 104(C4). P. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- 2) Ris R.C., Holthuijsen L.H., Booij N. A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification // *J. Geophys. Res. Ocean.* 1999. V. 104(C4). P. 7667–7681. <https://doi.org/10.1029/1998JC900123>
- 3) Saha S., Moorthi S., Pan H.-L. et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2010. V. 91. № 8. P. 1015–1058. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>
- 4) Saha S., Moorthi S., Wu X. et al. The NCEP Climate Forecast System Version 2. // *J. Clim.* 2014. V. 27. № 6. P. 2185–2208. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>
- 5) Gippius, F.N., Myslenkov, S.A., 2020. Black Sea wind wave climate with a focus on coastal regions. // *Ocean Eng.* 2020. V. 218. P. 108199. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108199>
- 6) Гишпиус Ф. Н., Мысленков С. А. Многолетняя изменчивость ветрового волнения в прибрежных акваториях Чёрного моря по данным численного моделирования // *Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых.* — г. Москва: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2021. — С. 53–54.

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ВОД В РАЙОНАХ ТРАНСФОРМНЫХ РАЗЛОМОВ ТРОПИЧЕСКОЙ АТЛАНТИКИ ПО ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Гиппиус Ф.Н.¹, Демидов А.Н.¹, Артамонова К.В.^{1,2,3}, Крашенинникова С.Б.⁴

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва

²Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, г. Москва

³Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, г. Москва

⁴Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: тропическая Атлантика, разлом Вима, разлом Романш, разлом Чейн, проход Кейн, разлом Долдрамс, водные массы, перенос вод, гидрологическая структура, гидрохимическая структура.

Атлантический океан занимает особое положение в глобальной термохалинной циркуляции, поскольку именно здесь происходит формирование глубинных и донных вод – Североатлантических глубинных вод (САГВ) в морях Лабрадор и Ирмингера и Антарктических донных вод (ААДВ) в море Уэддела. Особенностью является то, что указанные воды распространяются из умеренных широт по направлению к экватору по глубоководным районам западной Атлантики, в то время как их продвижению на восток препятствует Срединно-атлантический хребет (САХ). Единственными путями проникновения САГВ и ААДВ в восточную Атлантику являются трансформные разломы. Показано, что наиболее интенсивный перенос вод через САХ происходит в тропической Атлантике через разломы Вима, Романш, Чейн и Долдрамс [1]. Тем не менее, несмотря на интенсивные исследования циркуляции Атлантики в целом и её тропической области в частности в течение нескольких десятилетий [1–3], до сих пор нет чёткой и непротиворечивой картины распространения вод в этой части Мирового океана.

В нашей работе рассмотрены результаты экспедиционных исследований, выполненных в 45 рейсе НИС «Академик Николай Страхов» [4], 60 [5] и 63 рейсах НИС «Академик Иоффе» в 2019–2022 гг. В ходе этих экспедиций выполнено в общей сложности 72 станции, расположенные в районах трансформных разломов Вима, Долдрамс, Романш и Чейн, в проходе Кейн, Гвианской котловине, а также котловине Сьерра-Леоне. На всех станциях выполнялось гидрофизическое зондирование с определением температуры, солёности, мутности воды, содержания растворённого кислорода с помощью STD-зонда SBE 19plus V2. В 45 рейсе НИС «Академик Николай Страхов» и 63 рейсе НИС «Академик Иоффе» также определялись скорость и направление течений в толще воды с помощью акустического доплеровского измерителя течений Nortek Aquadopp 6000, а в 60 и 63 рейсе НИС «Академик Иоффе» отбирались пробы воды для лабораторного определения концентрации растворённого кислорода и основных биогенных элементов.

Основные выводы, сделанные по результатам этих измерений, заключаются в следующем:

- на главной седловине разлома Вима зафиксирована суточная изменчивость потенциальной температуры придонных вод в диапазоне 1.36–1.41 °С, что практически полностью перекрывает диапазон многолетней изменчивости. Также установлено, что вертикальное смещение изотермы 1.45 °С может достигать 300 м, а изотермы 2 °С – 150 м в течение суток. Перенос ААДВ через разлом Вима в восточном направлении составляет 0.9 Св. Установлено, что в 2022 г. граница ААДВ на главной седловине разлома Вима оказалась на 200 м глубже по сравнению с измерениями 2019 г;
- на основе совместного анализа потенциальной температуры и содержания растворённого кислорода показано, что для разломов Романш и Чейн границу ААДВ целесообразно проводить по изотерме 1.5 °С, а не 2 °С, как было предложено в [6];

- в Гвианской котловине отмечено распространение ААДВ вдоль западного склона САХ, а САГВ отмечена в западной части котловины у склонов поднятия Сеара и конуса выноса Амазонки. Несмотря на значительную глубину (более 4000 м), ААДВ в последнем районе не выявлена. По сравнению с результатами предыдущих исследований, выявлено потепление САГВ, а также похолодание и распреснение ААДВ в Гвианской котловине. В котловине Сьерра-Леоне выявлено потепление и осолонение вод в слое 1500–3500 м и похолодание и осолонение в слое 3500–4500 м.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 19-17-00110-П.

Список литературы

- 1) Morozov E., Demidov A., Tarakanov R., Zenk W. Abyssal Channels in the Atlantic Ocean: Water Structure and Flows / Springer, Ed. G. Weatherly. 2010. 266 pp. ISBN: 978-90-481-9357-8
- 2) Rhein M., Stramma L., Send U. The Atlantic Deep Western Boundary Current: Water masses and transport near the equator // J. of Geophys. Res. 1995. V. 100. no. C2, P. 2441–2457
- 3) Herrford J., Brandt P., Zenk W. Property changes of deep and bottom waters in the Western Tropical Atlantic // Deep. Res. Part I Oceanogr. Res. Pap. 2017. Vol. 124. P. 103–125
- 4) Иванова Е. В. и др. Комплексные исследования зон трансформных разломов Долдрамс и Вима в 45-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Николай Страхов” // Океанология. — 2020. — Т. 60, № 3. — С. 488–490.
- 5) Иванова Е. В. и др. Исследования осадконакопления и характеристик водных масс тропической Атлантики в 60-м рейсе НИС “Академик Иоффе” // Океанология. — 2022. — Т. 62, № 4. — С. 670–672.
- 6) Wüst G. / 1936. Deutsche Atlantische Expedition “Meteor” 1925–1927. 6 (1). Berlin. 411.

ТУРБУЛЕНТНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ В ЖЕЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ ПО НАТУРНЫМ ДАННЫМ

Демешко Д.М.¹, Осадчиев А.А.^{2,1}, Витинг К.Б.¹

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: физика океана, турбулентное перемешивание, турбулентность, диссипация кинетической энергии, масштаб Торпа, поток тепла, двойная диффузия.

Атлантическая водная масса попадает в Северный Ледовитый океан по двум потокам, один из которых идет вдоль континентального склона к северу от архипелага Земля Франца-Иосифа на восток (так называемая фрамовская ветвь), другой же проходит южнее через Баренцево море (баренцевоморская ветвь). После разделения обе ветви атлантического течения впервые встречаются в жёлобе Святой Анны, расположенного к северу от Новой земли, где испытывают активное турбулентное перемешивание друг с другом и с прилегающей водной массой. Тёплая фрамовская ветвь распространяется с севера вдоль западной части жёлоба, разворачивается и вытекает затем вдоль восточной его части. Тяжёлая и холодная баренцевоморская водная масса проходит с юга на север вдоль восточной части жёлоба. Турбулентность один из важнейших процессов в мировом океане, отвечающий за перенос энергии и импульса. Ключевым параметром, описывающих турбулентное перемешивание, является скорость диссипации турбулентной кинетической энергии ε (в дальнейшем скорость диссипации энергии). Этот параметр характеризует необратимый процесс преобразования турбулентной кинетической энергии в тепловую энергию, а также позволяет дать количественную оценку уровня турбулентности. В данной работе рассчитывается скорость диссипации энергии турбулентного перемешивания фрамовской и баренцевоморской ветвей в жёлобе Святой Анны по данным подробной гидрологической съёмки в августе и октябре 2021 года. Кроме того, рассчитывается плотностной коэффициент диффузии, который характеризует величину потока вещества через границу взаимодействия двух водных масс.

В верхнем слое (100 - 200 метров), где солёность и температура увеличиваются с глубиной, наблюдаются так называемые ступенчатые структуры, которые интерпретируются как проявление двойной диффузии, оказывающей большое влияние на интенсивность вертикального переноса тепла и соли. В данной работе оцениваются потоки тепла через верхнюю границу фрамовской водной массы. Таким образом, мы оцениваем потерю тепла при контакте с окружающими холодными арктическими водами атлантической водой при прохождении через желоб Святой Анны как через верхнюю границу (двойная диффузия), так и через нижнюю (турбулентное перемешивание).

В работе использовались значения потенциальной плотности, рассчитанные на основе данных, полученных при помощи STD-зонда SBE19plus на 55 гидрологических станциях в августе 2021 года и при помощи STD-зонда SBE911plus на 19 гидрологических станциях в октябре того же года. Станции организованы в разрезы, суммарно 6 раз пересекающие жёлоб Святой Анны.

Скорость диссипации энергии определяется формулой, в которую входят мелкомасштабные градиенты скорости движения жидкости, измерение которых зачастую сопряжено с техническими трудностями. В данной работе использовалась следующая приближенная формула:

$$\varepsilon = a^2 L_T^2 N^3,$$

где a - коэффициент пропорциональности, часто принимаемый в литературе за единицу, L_T - масштаб Торпа, рассчитываемый по профилям плотности, N - частота Вайсяля-Брента. Удобство этой формулы заключается в простоте измерения используемых данных, поскольку необходимо знать

лишь профили плотности, достаточно легко получаемые при помощи СТД-зондов. Способ получения L_T и N аналогичен способу, описанному в статье [1]. Чем больше относительная скорость потока, тем больше скорость диссипации энергии и тем интенсивнее происходит перемешивание. Коэффициент диффузии вычисляется по следующей формуле [2]:

$$K_\rho = \frac{\Gamma \varepsilon}{N},$$

где Γ - коэффициент интенсивности перемешивания, в литературе принимаемый за 0,2.

Для вычисления потока тепла в верхних слоях, где наблюдалось проявление двойной диффузии, использовалась параметризация Келли [3].

Проанализировав величины скорости диссипации энергии, можно сделать заключение о резкой смене характера течения фрамовских вод в жёлобе Святой Анны. Фрамовская ветвь поступает в жёлоб относительно широким потоком. После разворота течение распространяется в восточной части желоба и становится заметно более узким потоком, его скорость увеличивается, добавляется интенсивное перемешивание со слоем на глубине от 350 до 600 м, что соответствует взаимодействию фрамовской ветви и баренцевоморской. На основании рассчитанных значений потоков тепла можно сделать вывод о характере теплообмена на верхней и нижней границах атлантического течения и спрогнозировать убыль температуры ядра при распространении течения далее вдоль континентального склона.

Работа выполнена в рамках программы Плавание университетов при поддержке Министерства науки и высшего образования и Фонда целевого капитала МФТИ.

Список литературы

- 1) Benjamin D. Mater, Subhas K. Venayagamoorthy, Louis St. Laurent, and James N. Moum Biases in Thorpe-Scale Estimates of Turbulence Dissipation. Part I: Assessments from Large-Scale Overtorns in Oceanographic Data // Journal of Physical Oceanography – 2015. – Vol. 45, No. 10. – P. 2497–2521
- 2) Osborn T. R. Estimates of the local rate of vertical diffusion from dissipation measurements // Journal of Physical Oceanography – 1980. – Vol. 10, – P. 83–89
- 3) Kelley D.E. Fluxes through diffusive staircases: A new formulation // Journal of Geophysical Research. – 1990. – Vol. 95. – P. 3365-3371

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОТОКОВ ВОДЫ, ТЕПЛА И СОЛИ В ПЕЧОРСКОМ МОРЕ

Гордеева С.М., Дешова Д.В.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: физика океана, водообмен, объемный расход, поток тепла, поток соли, Печорское море.

Печорское море имеет огромное стратегическое значение для России, так как является аккумулятором природных ресурсов, сосредоточенных на его шельфе [1]. Акватория Печорского моря подвержена влиянию многих динамических процессов [2, 3]: транспорт североатлантических вод с запада, потоки воды из Белого моря и сток реки Печоры, водообмен с Карским морем через пролив Карские Ворота, а также взаимодействие с атмосферой через поверхность. В условиях текущего потепления климата эти процессы также меняются. Целью работы явилась оценка потоков воды, тепла и соли на границах Печорского моря.

На основе среднемесячных данных реанализа CMEMS GLORYS12V1 за период 1993-2019 гг. рассчитаны расход воды, потоки тепла и соли на границах Печорского моря (по долготе 50 в.д. на западе, широте 71 с.ш. на севере и в проливе Карские ворота).

В среднем многолетнем усреднении весь приходящий через границы и со стоком р. Печора объем вод (0,515 Св) практически равен испарению и уходу через границы акватории (0,514 Св).

Избыток тепла, поступающего в акваторию Печорского моря вследствие водообмена с соседними регионами (7,08 ТВт), почти полностью компенсируется расходом за счет взаимодействия с атмосферой (7,12 ТВт, где уход через границы 5,25 ТВт и уход в атмосферу 1,86 ТВт).

В балансе соли наблюдается невязка в поступлении (18,05 кт/с) и уходе (17,82 кт/с) через границы Печорского моря.

Потоки воды, тепла и соли через вертикальные разрезы на границах Печорского моря за исследуемый период имеют значимый положительный тренд. За 1993-2019 гг. объем теплой и соленой северо-атлантической воды, поступающей в регион с Колгуево-Печорским течением, увеличивался. Вместе с выявленными значительными трендами потоков воды, тепла и соли в проливе Карские ворота можно сделать вывод о возрастающем транзите северо-атлантической воды через бассейн Печорского моря в Карское море.

Список литературы

- 1) Прищепа О.М., Нефедов Ю.В., Айрапетян М.Г. Углеводородный потенциал акваториального арктического сектора севера Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции по результатам региональных исследований // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2020. Т. 15. №1. DOI: 10.17353/2070-5379/4_2020
- 2) Печорское море. Экологический атлас: Научно-популярное издание «Газпром-нефть». – СПб:Галерея Печати, 2018 – 144 с.
- 3) Писарев С.В. Обзор гидрологических условий Баренцева моря // Система Баренцева моря /Под. ред. акад. А.П.Лисицына.– М.: ГЕОС, 2021. –С. 153-166. DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(13)

ВОЛНЫ-УБИЙЦЫ У БЕРЕГОВ РОССИИ

Диденкулов О.И.¹, Диденкулова Е.Г.^{1,2}, Пелиновский Е.Н.^{1,2}

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

²Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Нижний Новгород

Ключевые слова: волны-убийцы, аномальные волны, моря, омывающие Россию, каталог, свидетельства очевидцев, натурные измерения.

Данная работа посвящена исследованию аномально больших волн, неожиданно возникающих в морях и океанах, получивших в русскоязычной литературе название волн-убийц. Это явление вызвало активный научный интерес после впервые зарегистрированной инструментально Новогодней волны на платформе Дропнер в Северном море 1 января 1995 года. Впоследствии волны-убийцы начали регистрировать в натурных измерениях и с помощью спутников из космоса [1-5]. Стала очевидной угроза волн-убийц для судов, нефте- и газодобычи, прибрежной инфраструктуры. Многочисленные происшествия, связанные с этими волнами отмечены в каталогах [6-10]. Показано, что они встречаются в различных акваториях, не только океанах, но также морях, заливах и даже реках.

В данной работе проведен анализ волн-убийц в морях, окружающих Россию, на основе доступных натурных измерений и описаний происшествий с неожиданными аномально большими волнами для определения важности проблемы волн-убийц для Российской Федерации.

Во-первых, в работе проанализированы натурные измерения вблизи берегов России. Измерения проводились в период 1996-2002 гг, в южной части Балтийского моря; с декабря 2000 г. по январь 2001 г. - в Каркинитском заливе (Черное море); в июне 2007 - на мысе Шульц (Японское море); в период с 6 по 24 октября 2009 – в поселке Кацивели (Крым); с 2007 года по настоящее время ведутся измерения водной поверхности придонными датчиками давления в нескольких локациях у о. Сахалин: у мыса Анива, Терпенья и м. Свободный. Показано, что в данных акваториях волны-убийцы, превышающие значительную высоту волнения более чем в два раза, формируются примерно два раза в сутки.

Во-вторых, проведен анализ случаев происшествий с волнами-убийцами в морях, окружающих Российскую Федерацию (12 событий), произошедших в следующих локациях: Азовское море, пролив Лаперуза, Курильские острова, Черное море, Камчатка, Сахалин, Охотское море, Крым, Калининградская область. Все эти встречи с волнами-убийцами были полной неожиданностью для очевидцев, и в некоторых случаях приводили к фатальным последствиям. В результате сделан вывод о том, что волны-убийцы встречаются в самых разных акваториях вблизи берегов РФ, и могут представлять угрозу как для судов, так и для людей, отдыхающих на берегу.

В-третьих, в работе приведены описания трех событий, когда в результате встреч с волнами-убийцами были повреждены российские суда. Первое - встреча с волной-убийцей российского танкера-рефрижератора "Таганрогский залив" 27 апреля 1984 г. в Индийском океане. Во-вторых, это крушение траулера «Картли» 18 декабря 1991 года у западного побережья Великобритании. Третье - описание крушения танкера «Находка» в условиях сильного шторма, перевозившего 20 тыс. тонн мазута, 2 января 1997 г в 105 км от японского острова Оки.

В результате проделанной работы показано, что проблема волн-убийц, зачастую встречающихся в различных акваториях Мирового океана, важна и для Российской Федерации, что необходимо учитывать при организации хозяйственной деятельности вблизи берегов и морях, окружающих РФ. Эти данные включены в каталоги волн-убийц в Мировом океане, которые непрерывно пополняются [10-11].

Исследования выполнены при поддержке Российского Научного Фонда (проект 19-12-00253).

Список литературы

- 1) Mori N., Liu P., Yasuda T. Analysis of freak wave measurements in the Sea of Japan // *Ocean Eng.* 2002. V. 29. P. 1399-1414
- 2) Stansell P. Distributions of freak wave heights measured in the North Sea // *Applied Ocean Research.* 2004. V. 26. P. 35-48
- 3) Didenkulova I., Anderson C. Freak waves of different types in the coastal zone of the Baltic Sea // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2010. V. 10. P. 2021-2029
- 4) Christou M., Ewans, K. Field Measurements of Rogue Water Waves // *Journal of Physical Oceanography.* 2014. V. 44. P. 2317–2335
- 5) Häfner D., Gemmrich J., Jochum M. Real-world rogue wave probabilities // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. P. 10084
- 6) Didenkulova I., Slunyaev A., Pelinovsky E., Kharif Ch. Freak waves in 2005 // *Natural Hazards and Earth System Sciences.* 2006. V. 6. P. 1007-1015
- 7) Liu P. C. A chronology of freak wave encounters // *Geofizika.* V. 24. 2007. P. 57–70
- 8) Nikolkina I., Didenkulova I. Catalogue of rogue waves reported in media in 2006-2010 // *Natural Hazards.* 2012. V. 61. P. 989-1006
- 9) O'Brien L., Renzi E., Dudley J.M., Clancy C., Dias F. Extreme wave events in Ireland: 2012 – 2016 // *Natural Hazards and Earth System Sciences.* 2018. V. 18. P. 729–758
- 10) Didenkulova E. Catalogue of rogue waves occurred in the World Ocean from 2011 to 2018 reported by mass media sources // *Ocean & Coastal Management.* 2020. V. 188. P. 105076
- 11) Didenkulova E., Didenkulova I., Medvedev I.: Freak wave events in 2005–2021: statistics and analysis of favourable wave and wind conditions // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* [preprint]. 2022. in review.

ВОЛНЫ-УБИЙЦЫ В 2005-2021: СТАТИСТИКА, АНАЛИЗ ВОЛНОВЫХ И ВЕТРОВЫХ УСЛОВИЙ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Диденкулова Е.Г. ^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Нижний Новгород*

² *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

Ключевые слова: волны-убийцы, ветровые волны, каталог волн-убийц, уравнение Кортевега-де Вриза, численное моделирование.

Неожиданные большие волны, известные как волны-убийцы, представляют собой явление, возникающее в Мировом океане и причиняющее значительный ущерб судам и прибрежным сооружениям. Согласно каталогам волн-убийц [1-4], собранным преимущественно на основе средств массовой информации, с 2005 по 2021 волны-убийцы привели к травмированию 575 людей, смерти 658 человек, повреждению 102 и затоплению 55 судов, включая маленьких рыбацких лодок и больших кораблей. Модуляционная неустойчивость, дисперсионная и геометрическая фокусировка, взаимодействие волн с течениями, взаимодействие когерентных структур (солитонов и бризеров) считаются основными процессами, ответственными за формирование волн-убийц [5]. Однако волны-убийцы по-прежнему рассматриваются как случайные явления с большой неопределенностью и плохим прогнозированием. Имеющиеся данные доказывают существование волн-убийц различной формы. Существуют описания аномально больших волн в виде «белой стены», «одиночной башни», «трех сестер» (группы из нескольких отдельных волн). Иногда перед ними движется впадина глубиной в несколько метров, так называемая «дыра в море».

В настоящей статье проведено численное моделирование состояния моря с условиями, близкими к волновым явлениям, произошедшим в бухте Тилламук, штат Орегон, 25 января 2007 г. На южном причале бухты Тилламук вблизи Гарибальди потерпел крушение F/V Starrigavan; погиб один рыбак и были ранены ещё трое человек. Полное описание события дано на сайте <http://thefishwife.blogspot.com/2007/01/fv-starrigavan-wrecked-on-tillamook.html>. Выживший сообщил, что на судно обрушилось три 20-футовых волны. Сообщалось, что скорость ветра в то время составляла около 17 миль в час, а высота волн — 11 футов. «Возможно, они были стали жертвами волнам-убийц», — заявили в береговой охране. Приблизительные координаты события: 45.557697, -123.931691. Глубина воды около 7 метров по данным сервиса [multimaps \(https://multimaps.ru/\)](https://multimaps.ru/). Волновые и ветровые условия (такие как скорость ветра, период волн и значительная высота волн) в этот день были взяты из модели реанализа ERA5 и использованы в численном моделировании. Уравнение Кортевега – де Вриза выбрано в качестве модели для численного моделирования, поскольку оно представляет собой эталонную модель волн на мелководье со слабой нелинейностью и дисперсией [6]. В качестве модели аппроксимации спектра ветрового волнения использовался спектр Пирсона–Московица, зависящий только от скорости ветра. Численное моделирование уравнения КдВ с периодическими граничными условиями основано на псевдоспектральном методе. Исходное поле ветровых волн задается в виде ряда Фурье. Проанализированы возможные сценарии возникновения волн-убийц. Рассмотрена эволюция волн-убийц трех возможных форм, таких как знакопеременная, «две сестры» и «три сестры» (группа из трех аномально больших волн). Показано, что время жизни волн-убийцы увеличивается с ростом числа индивидуальных волн в аномальном волновом пакете. Время исчезновения «одной, двух и трех сестер» составляет около 2, 7 и 11 минут соответственно.

Исследования выполнены при поддержке Российского Научного Фонда (грант № 21-77-00003).

Список литературы

- 1) Liu P. C. A chronology of freak wave encounters // *Geofizika*. V. 24. 2007. P. 57–70
- 2) Nikolkina I., Didenkulova I. Catalogue of rogue waves reported in media in 2006-2010 // *Natural Hazards*. 2012. V. 61. P. 989-1006
- 3) O'Brien L., Renzi E., Dudley J.M., Clancy C., Dias F. Extreme wave events in Ireland: 2012 – 2016 // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2018. V. 18. P. 729–758
- 4) Didenkulova E. Catalogue of rogue waves occurred in the World Ocean from 2011 to 2018 reported by mass media sources // *Ocean & Coastal Management*. 2020. V. 188. P. 105076
- 5) Kharif, Ch. and Pelinovsky, E.: Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon, *European Journal of Mechanics B/Fluids*. 2003. V. 22. P. 603-634
- 6) Didenkulova (Shurgalina) E.G., Slunyaev A.V., Pelinovsky E.N. Numerical simulation of random bimodal wave systems in the KdV framework // *European Journal of Mechanics - B/Fluids*. 2019. V. 78. P. 21-31

АНАЛИЗ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ АССИМИЛЯЦИИ В ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ДАННЫХ ТРЕХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СЪЕМОК 2016 ГОДА

Евстигнеева Н.А., Демьшев С.Г.

ФГБУН Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

Ключевые слова: численное моделирование, ассимиляция данных наблюдений, поля течений, мезомасштабные особенности циркуляции.

Морской гидрофизический институт (МГИ) активно продолжает экспедиционные наблюдения за термохалинной структурой вод Черного моря, которые позволяют пополнять базу гидрологических данных моря, выявлять и уточнять ряд особенностей гидрофизических полей на различных масштабах [1]. Актуальность данного исследования заключается в возможности более эффективно использовать получаемые данные измерений. В 2016 г. было выполнено несколько последовательных гидрологических съемок (экспедиции 87, 89 и 91-го рейсов НИС «Профессор Водяницкий»), которые позволили восстановить непрерывные трехмерные гидрофизические поля и сравнить полученные особенности циркуляции в зависимости от времени года.

В настоящей работе на основе вихреразрешающей гидродинамической модели МГИ [2] и процедуры ассимиляции [3] экспедиционных данных по температуре и солёности проведены три численные эксперимента по реконструкции полей течений в периоды проведения гидрологических съемок в 2016 г.: с 28 июня по 18 июля (летний сезон), с 29 сентября по 20 октября (осенний сезон) и с 15 ноября по 5 декабря (осенне-зимний сезон).

Использовалась горизонтальная сетка $1,64 \times 1,64$ км и 27 горизонтов по вертикали. Данные о вертикальном распределении температуры и солёности в 2016 г. были взяты из банка данных МГИ [4]. Для задания атмосферного воздействия, близкого к наблюдаемому, учитывались данные греческого центра атмосферных прогнозов SKIRON ($1/10^9$) [5].

Для изучения возможных механизмов формирования восстановленных особенностей динамики течений выделены и проанализированы наиболее энергетически значимые компоненты в уравнениях бюджета кинетической и потенциальной энергии.

Для летнего периода отмечена значительная роль в формировании динамики вод потока Основного Черноморского течения (ОЧТ), неравномерного и неоднородного поля ветра (скорость которого изменялась от 1 до 12 м/с; направление изменялось с западного на северо-восточное) и влияния на течение очертаний береговой линии и неоднородностей рельефа. Вдоль Крымского побережья наблюдался поток струи ОЧТ (с максимальной скоростью до 40 см/с). При некотором ослаблении ветрового воздействия течение было выражено слабее, отмечено формирование вихрей различных знаков с обеих сторон от стрежня. Получены антициклонические вихри с радиусом около 30 км в западной части области и циклонические вихри с радиусом около 40 км в восточной глубоководной части области. Прибрежная часть области характеризовалась интенсивной работой вертикальной диссипации. При отсутствии сильных ветров отмечено усиление процессов бароклинной неустойчивости и в поле течений формировались мезо- и субмезомасштабные структуры. Вблизи г. Ялта наблюдалось квазипериодическое формирование антициклонического вихря с радиусом около 25 км (возможный механизм – сдвиговая неустойчивость).

В осенний период наблюдалась узкая, прижатая к Крымскому побережью, струя ОЧТ, а также антициклонические вихри с радиусами около 30 км вблизи г. Севастополь и вихри с радиусами около 40 км различного знака завихренности в западной, центральной и восточной частях области. При обтекании ОЧТ неровностей береговой линии генерировались вихри малых масштабов в верхнем слое вдоль восточного побережья Крыма (в зонах, соответствующих минимальным значениям

слагаемого, определяющего вклад кинетической энергии от ветра). При усилении ветрового воздействия до 15 м/с максимальная скорость ОЧТ достигала значения 54 см/с, все перечисленные вихревые образования были выражены слабее в верхнем слое.

В осенне-зимний период ОЧТ имело ярко выраженный струйный характер (с максимальной скоростью до 52 см/с при ветровом воздействии до 17 м/с). При некотором ослаблении ветрового воздействия генерировались вихри разных масштабов между берегом и ОЧТ. В западной части отмечено формирование и развитие циклонических и антициклонических вихрей разного масштаба. В течение дальнейшего расчета они могли сливаться в один более крупный. Вдоль Крымского побережья могли развиваться процессы сдвиговой неустойчивости (разнонаправленные ветер и течения на поверхности), а также бароклиной неустойчивости (переход из кинетической энергии в потенциальную).

В течение всех трех расчетов могли наблюдаться антициклонические вихри вблизи г. Севастополь и вихри различного знака завихренности в западной части области, центральной и в восточной частях области. Вдоль побережья в верхнем слое при обтекании ОЧТ береговой линии и неоднородностей рельефа дна при действии слабых ветров генерировались антициклонические и циклонические вихри малых масштабов. В летний сезон отмечено некоторое ослабление струи ОЧТ и формирование большего количества вихрей, по сравнению с другими сезонами, благодаря усилению процессов бароклиной и сдвиговой неустойчивости.

Расчеты гидрофизических полей на основе модели МГИ с учетом данных гидрологических съемок 2016 г. выполнены в рамках государственного задания по теме № FNNN-2021-0003 (шифр «Оперативная океанология»). Анализ энергетических характеристик и изучение возможных физических механизмов генерации особенностей циркуляции проведен в рамках государственного задания по теме № FNNN-2021-0004 (шифр «Океанологические процессы»).

Список литературы

- 1) Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Алексеев Д.В. и др. Гидрологические исследования в северной части Черного моря в 2016 г. (87-й, 89-й и 91-й рейсы НИС «Профес-сор Водяницкий») // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 3. С. 247–253
- 2) Demyshev S.G. A numerical model of online forecasting Black Sea currents // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2012. Vol. 48. P. 120–132. doi:10.1134/S0001433812010021
- 3) Кныш В.В., Моисеенко В.А., Чернов В.В. Некоторые результаты четырехмерного анализа гидрофизических полей в Тропической Атлантике // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1988. Т. 24. № 7. С. 744–752
- 4) Суворов А.М., Андрющенко Е.Г., Годин Е.А. и др. Банк океанологических данных МГИ НАНУ: содержание и структура баз данных, система управления базами данных // *Системы контроля окружающей среды.* 2003. С. 130–137
- 5) NonHydrostatic SKIRON/Eta Modelling System. URL: <http://forecast.uoa.gr/forecastnew.php>

ОЦЕНКА СЕЗОННЫХ И МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЬДОВ ГРЕНЛАНДСКОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ

Егорова Е.С., Миронов Е.У.

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Гренландское море, Баренцево море, ледяной покров, старые льды, однолетние льды, возрастной состав, зимний период.

Современное состояние арктического ледяного покрова является предметом пристального внимания со стороны ученых и исследователей полярных регионов во всем мире. Происходящие с конца 80-х гг. – начала 90-х гг. XX в. глобальные изменения климатической системы Земли наиболее ярко проявляются в высоких широтах Северного полушария. В летний сезон в Северном Ледовитом океане (СЛО) отмечается максимальное уменьшение площади льдов [1], а в зимние месяцы сокращается средняя толщина ледяного покрова (и как следствие его объем), что проявляется в замещении старых толстых льдов более тонкими однолетними [2]. По состоянию на 2018 г., согласно оценке [3], старые льды покрывают менее 30 % площади всего СЛО, по сравнению с 60 % в начале 1980-х гг.

Гренландское и Баренцева моря, расположенные в Северо-Европейском бассейне СЛО, являются регионом наиболее быстрых климатических изменений в Арктике [4]. Этот регион находится под влиянием поступающих сюда теплых атлантических и холодных арктических водных масс, а также под воздействием системы Исландского атмосферного минимума, что создает особые ледовые условия на акваториях морей. Ледяной покров и чистая вода здесь присутствуют в разных соотношениях круглогодично. Возрастной состав льдов Гренландского и Баренцева морей является показательной характеристикой прежде всего в вопросе изменений климата в арктическом регионе.

В настоящей работе для периода 1997–2022 гг. был выполнен анализ сезонных и межгодовых изменений возрастной структуры льдов Гренландского и Баренцева морей для семи стандартных градаций возраста ледяного покрова. Оценки площади льдов различных возрастных градаций были получены с использованием электронного архива региональных ледовых карт, доступных в электронном каталоге Мирового центра данных по морскому льду Арктического и антарктического научно-исследовательского института (МЦД МЛ ААНИИ, [5]). Данные о возрастном составе льдов ограничены зимними месяцами (октябрь–май), т.е. периодом формирования и развития ледяного покрова.

Показано, что в октябре–марте в возрастной структуре ледяного покрова Баренцева моря преобладают начальные и молодые льды, в апреле–мае — однолетние. Старые льды наблюдаются на акватории северных (западного и северо-восточного) районов моря на протяжении всего холодного периода, но их количество не превышает 4 % относительно общей площади ледяного покрова моря. В юго-восточной части Баренцева моря, где отмечаются наиболее легкие ледовые условия среди других частей моря, не характерно наличие однолетних толстых и старых льдов при средних условиях.

В сезонном цикле изменений возрастного состава ледяного покрова Гренландского моря выявлена важная особенность: в течение всего зимнего периода на его акватории преобладают старые льды, занимающие не менее 30 % от общей площади льдов моря. При этом начальные и молодые льды занимают около 25 % от площади ледяного покрова Гренландского моря, однолетние — порядка 30 %. Среди льдов местного образования начальные и молодые льды преобладают в ледяном покрове Гренландского моря в октябре–феврале, однолетние — в марте–мае.

Выделенные за период 1997–2022 гг. линейные тренды являются статистически незначимыми. Таким образом, на фоне наблюдающегося сокращения общей площади ледяного покрова Грен-

ландского и Баренцева морей количество льдов различных возрастных градаций изменяется в пределах естественной изменчивости. Поэтому только на основании данных о возрастной структуре ледяного покрова за 25-летний период наблюдений нельзя сделать однозначный вывод об уменьшении толщины льдов на акваториях морей. Нелинейные тренды (полиномы второй степени) всех рассматриваемых возрастных градаций Гренландского моря, кроме начальных видов и молодых льдов, являются статистически значимыми. Это говорит о большой внутренней изменчивости возрастной структуры ледяного покрова моря с периодом, меньшим, чем рассматриваемый 25-летний период. Нелинейные тренды площадей льдов различного возраста на акватории Баренцева моря оказались статистически незначимыми.

При сравнении оценок возрастной структуры ледяного покрова рассматриваемых морей, полученных в настоящем исследовании, с более ранними оценками можно сказать, что его средняя толщина в начале XXI в. уменьшилась по сравнению с периодами 1988–1992 гг. и 1971–1976 гг. соответственно для Гренландского и Баренцева морей. При учете статистической незначимости линейных трендов межгодовых колебаний количества льдов различных возрастных градаций следует считать, что количественные изменения в возрастном составе ледяного покрова Гренландского и Баренцева морей начались раньше 1997 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-27-00443.

Список литературы

- 1) Stroeve J., Notz D. Changing state of Arctic sea ice across all seasons // *Environmental Research Letters*. 2018. Vol. 13. No. 10. 103001
- 2) Александров В.Ю., Йоханнессен О.М. Изменение толщины льда в Арктике с конца XIX века // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2012. Т. 94. № 4. С. 63–73
- 3) Kwok R. Arctic sea ice thickness, volume and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2018) // *Environmental Research Letters*. 2018. Vol. 13. No. 10. 105005
- 4) Гудкович З. М., Захаров В. Ф., Аксенов Е. О., Позднышев С. П. Взаимосвязь современных климатических изменений в атмосфере, океане и ледяном покрове // *Труды ААНИИ*. 1997. Т. 437. С. 7–17
- 5) Архив Мирового центра данных по морскому льду. [Электронный ресурс]. URL: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004/> (Дата обращения: 05.09.2022)

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СУДОВОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАДАРА

Ежова Е.А.^{1,2}, Гавриков А.В.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук, г. Москва

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) г. Москва

Ключевые слова: ветровое волнение, значительная высота волны, радарные данные.

Измерение параметров ветрового волнения имеет большое значение для улучшения точности численных моделей волнения. Особенно остро стоит вопрос сбора и обработки данных наблюдений. Если вдоль береговой линии в некоторых районах имеется плотное покрытие волномерными буюми, то в центральных областях океана данных фактически нет. В перспективе описанная разработка позволяет подключиться к практически любому навигационному радару и получать параметры состояния и динамики морской поверхности в автоматическом режиме.

Используемые в настоящей работе данные были собраны в рамках 63-го рейса научно-исследовательского судна "Академик Иоффе". В этой экспедиции измерения ветрового волнения проводились одновременно с помощью двух волномерных буюв Spotter и приставки SeaVision, подключенной к судовому радиолокационному радару JMA-9122-6XA.

Радарные данные представляют собой набор изображений, соответствующих мощности отраженного сигнала от поверхности волнения. Исходный сигнал имеет вид зависимости плотности энергии $S(x, y, t)$ от пространственных координат x, y и времени t . Алгоритм обработки данных основан на трехмерном преобразовании Фурье [1]. Преобразованный сигнал имеет вид $S(\mathbf{k}, \omega)$, где \mathbf{k} – двумерный волновой вектор, ω – временная частота колебаний. Согласно линейной теории волн на глубокой воде, основная энергия колебаний поверхности должна лежать внутри кривой, которая описывается дисперсионным соотношением:

$$\omega = \sqrt{gk} - \mathbf{k} \cdot \mathbf{V}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, $k = |\mathbf{k}|$ – волновое число, \mathbf{V} – скорость движения радара. При работе с волномерными буюми судно находилось в дрейфе, поэтому при отсутствии течения второе слагаемое в (1) можно не учитывать.

Для оценки средней высоты трети высочайших волн H_s (значительной высоты волны) вычисляется отношение основного сигнала – энергии, лежащей возле кривой дисперсионного соотношения, в области Ω – к шуму (Signal-to-noise ratio)

$$SNR = \frac{\int \int \int_{\Omega} S(k_x, k_y, \omega) dk_x dk_y d\omega}{\int \int \int_{\bar{\Omega}} S(k_x, k_y, \omega) dk_x dk_y d\omega}. \quad (2)$$

Согласно теории, предложенной в [2], считается, что

$$H_s = A + B\sqrt{SNR}, \quad (3)$$

где A и B – некоторые коэффициенты, которые в работе устанавливаются из валидации модели по спектру, полученному буюми и данным спутниковой альтиметрии.

Для определения направлений волновых пакетов используется преобразование Радона:

$$R(\rho, \theta, t) = \int S(\rho \cos \theta - z \sin \theta, \rho \sin \theta + z \cos \theta, t) dz, \quad (4)$$

где ρ – расстояние от нуля до хорды, вдоль которой ведется интегрирование, θ – угол наклона нормали к хорде, z – координата вдоль хорды, отсчитываемая от точки пересечения с осью Ox . Полученный сигнал $R(\rho, \theta, t)$ можно интерпретировать как свертку исходного сигнала в полярных координатах. Вдоль хорд, сонаправленных с гребнями волны, наблюдаются экстремумы среднеквадратичного отклонения полученной функции.

Результатом работы являются подобранные коэффициенты A и B для (3), необходимые для дальнейшей обработки данных. Для волн выше 3 метров наблюдается увеличение ошибки определения высоты волны, что связано с недостаточной выборкой данных для анализа высоких волн. Обработка радарных изображений сопряжена со сложностями в фильтрации сигнала от гладкой поверхности, от пены на гребнях волн и может быть затруднена в условиях дождя. Предложенный алгоритм восстановления направления основных пакетов волны показывает хорошие результаты. Дальнейшая разработка алгоритма охватывает определение параметров длины и периода волны, разделения волн на пакеты.

Работа выполнена в рамках госзадания № FMWE-2022-0002.

Список литературы

- 1) Tilinina N. et al. Wind waves in the North Atlantic from ship navigational radar: SeaVision development and its validation with the Spotter wave buoy and WaveWatch III //Earth System Science Data. – 2022. – Т. 14. – №. 8. – С. 3615–3633
- 2) Borge J. C. N., Reichert K., Dittmer J. Use of nautical radar as a wave monitoring instrument //Coastal Engineering. – 1999. – Т. 37. – №. 3-4. – С. 331-342

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ БАРОКЛИННЫХ ВИХРЕЙ В ДВУХСЛОЙНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

Елкин Д.Н., Зацепин А.Г., Шварцман Д.Р.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Москва*

Ключевые слова: вихри открытого океана, лабораторное моделирование, двуслойно стратифицированная вращающаяся жидкость, бароклинная неустойчивость, вязкое вырождение, гладкое, шероховатое, наклонное дно.

Одной из важных структурных форм организации движения вод океана являются мезомасштабные бароклинные вихри [1]. Образование этих вихрей происходит под действием различных механизмов, включающих в себя влияние топографических и орографических неоднородностей на океанские течения, пространственно-неоднородное воздействие ветра, а также бароклинную неустойчивость стратифицированных по плотности течений, характеризующихся наличием вертикального градиента скорости. Наряду с фронтальными вихрями, вследствие бароклинной неустойчивости образуются и, так называемые, «вихри открытого океана» [1]. Эти вихри не имеют внутри себя ядра инородных вод и представляют собой единую водную массу с окружающими водами. Орбитальная скорость течения и завихренность в них формируются благодаря локальному подъему или, опусканию изопикнических поверхностей. В первом случае образуются циклонические вихри, а во втором случае – антициклонические.

Целью текущей работы является установление путем лабораторного моделирования закономерностей процесса неустойчивости и вязкого вырождения бароклинных вихрей открытого океана в условиях гладкого и шероховатого дна. В качестве механизма создания вихрей использовался метод «внутреннего цилиндра». С помощью этого метода создавались циклонические и антициклонические вихри в двухслойно стратифицированной по солености водной среде в цилиндрическом бассейне, расположенном на вращающейся платформе.

Опыты проводились следующим образом. В раскрученную до твердотельного вращения двуслойно-стратифицированную по солености водную среду с помощью специально разработанного устройства автоматическим образом вертикально погружался полый цилиндр на глубину, превышающую толщину верхнего слоя. Верхний слой воды в цилиндре подкрашивался. Для создания циклона часть подкрашенной воды верхнего слоя откачивалась, а для создания антициклона дополнительное количество подкрашенной воды той же плотности добавлялось в верхний слой внутри цилиндра. После того, как созданное этой процедурой возмущение водной среды затухало, цилиндр автоматическим образом быстро вынимался из воды и, вместе с устройством его перемещения, снимался с вращающейся платформы. Под действием горизонтального градиента давления менее плотная пресная вода сжимается по вертикали, растекаясь при этом в радиальном направлении. Под действием силы Кориолиса: после добавления воды в цилиндр она закручивается в антициклоническом направлении, а после откачивания воды из цилиндра она закручивается в циклоническом направлении и образуется фронтальный бароклинный вихрь: после добавления воды антициклонический, а после откачивания воды циклонический. Непосредственно перед поднятием цилиндра включались две видеокамеры, расположенные как над платформой, так и сбоку вблизи стенки бассейна. Они осуществляли запись процесса эволюции вихря в бассейне, визуализированной красителями. Для определения горизонтального распределения скорости течения, обусловленной вихрями, на поверхность воды помещались бумажные пелетки. Опыты продолжались до тех пор, пока вихри не вырождались либо из-за вязкого трения на дне и на боковой стенке бассейна, либо вследствие неустойчивости и распада первоначального вихря на вторичные

вихревые структуры. При этом одни и те же опыты проводились над гладким и шероховатым дном.

Данные видеосъемки эволюции вихрей обрабатывались с помощью специальных компьютерных программ. Рассчитывалась орбитальная скорость вихря в верхнем слое, ее распределение в зависимости от расстояния от центра вихря. Идентифицировались особенности его эволюции (инерционные колебания в процессе геострофического приспособления, бароклинная неустойчивость и распад вихря на вторичные вихревые структуры, или его постепенное вязкое вырождение). Определялись безразмерные параметры: числа Россби, Бюргера и Фруда.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

Установлено, что в начале каждого опыта происходит процесс геострофического приспособления вихря, сопровождающийся радиальными колебаниями на удвоенной частоте вращения платформы. Эти колебания затухают на протяжении $5-10T$, где T – период вращения платформы (лабораторные сутки). Установлено, что частота этих колебаний близка к значению параметра Кориолиса, однако для циклонов она несколько больше, чем для антициклонов. Таким образом, данные колебания являются инерционными. Для осесимметричных (устойчивых) циклонических вихрей на практике подтверждено экспоненциальное затухание скорости вихря со временем. В опытах с некоторыми антициклоническими вихрями обнаружен эффект периодического ускорения скорости вращения вихря в процессе его затухания, который нуждается в теоретическом обосновании.

Влияние шероховатости дна на процесс затухания вихревых структур было слабо выраженным даже тогда, когда шероховатость существенно превышала масштаб Экмана. Из этого следует, что затухание вихря происходило в основном благодаря горизонтальному, а не вертикальному трению.

Установлено, что неустойчивость вихрей и их распад на вторичные вихревые структуры происходит при значениях начального числа Бюргера (Bu_0) существенно меньших единицы, как было показано ранее в опытах с фронтальными вихрями, содержащими воду другой плотности по сравнению с окружающей их водой [2, 3].

Циклоны являются менее устойчивыми по сравнению с антициклонами. Это связано с их большей агеострофичностью, т.е., большим влиянием центробежной силы на динамику вихря. С учетом этого, найден критерий устойчивости, единый для циклонов и антициклонов, определяющийся отношением числа Бюргера к числу Фруда. Шероховатость дна увеличивает устойчивость, как циклонических, так и антициклонических вихрей. Такой же, стабилизирующий вихри эффект, обнаружен и в случае наклонного дна.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № FMWE-2021-0002, при финансовой поддержке гранта РФФ № 21-77-10052.

Список литературы

- 1) Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С. Синоптические вихри в океане - Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. - 264 с.
- 2) Saunders P.M. The Instability of a Baroclinic Vortex // J. Phys. Oceanogr. 3(1973): 61–65
- 3) Зацепин А.Г., Костяной А.Г. Лабораторные исследования неустойчивости бароклинных вихрей и фронтов. – В сб.: Когерентные структуры и самоорганизация океанских движений. М.: Наука. 1992. С.163-176

ОСОБЕННОСТИ ЛЕДОВОЙ ДИНАМИКИ ПРЕДПРОЛИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ЧУКОТСКОГО МОРЯ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Жук В.Р., Кубряков А.А., Новиков Б.А., Медведева А.В.

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: физика океана, морской лед, Чукотское море, спутниковые данные.

Перенос льда из Северного Ледовитого океана в тихоокеанскую акваторию существенно влияет на транспорт тепла, термохалинную структуру [1,2]. В данной работе исследуются особенности переноса льда на юг через Берингов пролив по спутниковым инфракрасным и оптическим измерениям MODIS, а также контактными ADCP измерениям. Анализ влияния ветра проведен по данным реанализа ERA5.

Анализ данных о скорости течений, полученных в Беринговом проливе в 2012 году, продемонстрировал существенное ослабление северо-направленного потока. Сглаженные 4-х дневным скользящим средним значения южных скоростей составили до 33 см/с и наблюдались в промежутках до 8 дней. Анализ поля ветра показал, что вероятной причиной таких ослаблений является интенсификация северных ветров. Согласно инфракрасным измерениям температуры льда и данным в оптическом диапазоне фиксируется несколько событий выноса льда из Чукотского моря в Берингово море во время 2012 года: 26 февраля – 2 марта и 15 – 20 марта. Для рассматриваемых случаев характерно формирование ледовой арки в предпроливной зоне на юге Чукотского моря и последующее обрушение с образованием трещин параболической формы длиной около 270 км. Отметим, что температура ледового покрова в районе формирования разломов превышала значения окружающего льда на 5-15°С. Во время первого события местоположения разломов наблюдались до 71,6° с.ш., преимущественно в центральной области моря. Во втором событии эта же область смещена в сторону северо-востока до 71,8° с.ш. Разница в локализации трещин обусловлена в первую очередь перестройкой ветров, а конкретней сменой северных ветров на северо-восточные.

На основе последовательных изображений MODIS методом кросскорреляционного анализа проведены оценки скорости дрейфа льда, которые составили в среднем за период выноса около 0,09 м/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-17-00278.

Список литературы

- 1) Babb D. G., Galley R. G., Asplin M. G., Lukovich J. V., and D. G. Barber Multiyear sea ice export through the Bering Strait during winter 2011–2012 // J. Geophys. Res. Oceans. V. 118. 2013. Pp. 5489–5503. doi:10.1002/jgrc.20383.
- 2) Moore G.W.K., Howell S.E.L., Brady, M. et al. Anomalous collapses of Nares Strait ice arches leads to enhanced export of Arctic sea ice. // Nat Commun. V.12 (1). 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20314-w>

СТРУКТУРА ПЛЮМА ОБИ-ЕНИСЕЯ ПОЗДНЕЙ ОСЕНЬЮ ПЕРЕД ЛЕДООБРАЗОВАНИЕМ

Осадчиев А.А.^{1,2}, Забудкина З.В.², Рогожин В.С.³, Фрей Д.И.^{1,4}, Гордей А.С.¹,
Спивак Э.А.⁵, Салюк А.Н.⁵, Семилетов И.П.⁵, Седаков Р.О.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

³Центр морских исследований МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

⁴Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

⁵Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: речной плюм, зимняя конвекция, стратификация, поверхностный слой, Обь, Енисей, Карское море, Северный Ледовитый океан.

Значительное число исследований в последние десятилетия было посвящено большим речным плюмам в Северном Ледовитом океане. В основном в этих работах рассматривалось состояние речных плюмов летом и ранней осенью, однако мало что известно о структуре и процессах в этих речных плюмах поздней осенью перед ледообразованием. В этой работе на основе натурных данных, собранных в пяти экспедициях, проводившихся в конце октября в 2020-2022 годах в Карском море, нами была изучена структура плюма Оби-Енисея. На основе натурных данных и разработанной нами одномерной численной модели был описан процесс вертикальной конвекции, развивающейся осенью в плюме Оби-Енисея в результате активной потери тепла поверхностным слоем моря. Было показано, что конвекция, происходящая в течение относительно короткого периода времени поздней осенью до начала ледообразования значительно изменяет вертикальную структуру плюма Оби-Енисея.

Натурные измерения, проведенные в Карском море в конце октября в рамках пяти различных экспедиций, продемонстрировали значительные различия в вертикальной термохалинной структуре плюма Оби-Енисея по сравнению с его состоянием в июле-сентябре. Практически по всей площади плюма наблюдалась однородная вертикальная структура от поверхности моря до нижней границы плюма и аномально резкий скачок солёности на этой границе (на 10-12 епс на вертикальном расстоянии 1-2 м). Такие резкие градиенты не наблюдаются в плюме Оби-Енисея в другие периоды года. Мы предполагаем, что они возникают в результате осенней конвекции, формирующейся в холодный период года до начала ледообразования из-за потери тепла с поверхности воды в результате взаимодействия с холодными воздушными массами. Конвекция вызывает вертикальное перемешивание в плюме, увеличивает его глубину и гомогенизирует солёность в плюме [1]. Пограничный слой между плюмом и морем постепенно вовлекается в перемешанный слой, при этом конвекция не проникает ниже этого слоя из-за высокой солёности и плотности нижележащей морской воды. Этот процесс приводит к образованию аномально резкого градиента между плюмом и нижележащим морем.

Для доказательства этого предположения мы разработали одномерную численную модель, воспроизводящую конвекцию в Карском море с середины августа по конец октября. Модель воспроизводит вертикальную толщу воды в виде набора слоев с фиксированным вертикальным размером. На каждом шаге модели температура верхнего слоя снижается из-за взаимодействия с холодным воздухом, в результате чего его плотность увеличивается. Теплообмен в толще воды определяется уравнением теплопроводности [2]. Теплообмен верхнего слоя воды с атмосферой зависит от скорости ветра и разницы температур воздуха и поверхности моря [3]. Опускание охладившихся слоев воспроизводится их сортировкой по вертикали по возрастанию их плотности. Охлаждение поверхностного слоя происходит намного медленнее, чем скорость вертикальной конвекции и перемешивания, поэтому конвективный слой на каждом шаге модели усредняется по температуре

и солености [1]. Модель также воспроизводит турбулентное перемешивание, возникающее из-за резкого замедления вертикального конвективного потока на нижней границе перемешанного слоя [1,4].

Профили температуры и солености, полученные в экспедициях, использовались как в качестве начальных данных, так и для сравнения результатов расчетов с натурными данными в соответствующие периоды времени. Результаты моделирования показали, что толщина пограничного слоя между плюмом и морем уменьшается с 5-10 м в августе до 1-2 м в конце октября, что приводит к формированию резкого скачка солености. Конвекция была особенно интенсивна во время штормовых ветров (до 15 м/с), которые становятся частыми в конце сентября и октябре. Средняя скорость углубления конвективного слоя в эти дни составляла порядка 1 м/с. К концу октября температура поверхностных вод приближается к температуре наибольшей плотности (0°C) и конвекция останавливается.

Резкий градиент солености на вертикальной границе плюм-море по данным натурных измерений не наблюдался только в Обской губе и Енисейском заливе, а также на боковой границе плюма. Поверхностная соленость в заливах остается низкой (5-7 епс) даже в августе и сентябре, поэтому соответствующие температуры максимальной плотности относительно высоки и влияние охлаждения на плотность воды невелико. Численное моделирование плюма в Обской губе показало, что конвекция не распространяется ниже 6 м и не влияет на нижнюю границу плюма, что согласуется с натурными измерениями. На боковой границе плюма моделирование, напротив, предсказывает наличие конвекции, хотя в натурных измерениях этого не наблюдается. Мы предполагаем, что интенсивное горизонтальное перемешивание на латеральной границе плюма эффективно размывает резкий градиент солености, который мог бы образоваться в результате конвекции, однако этот процесс требует специализированного исследования.

Мы предполагаем, что аналогичный процесс конвекции и формирования однородного слоя с резким скачком солености должен существовать и в других речных плюмах в Арктике. Формирование резкого скачка плотности снижает трение между плюмом и нижележащим морем, что может сильно повлиять на динамику распространения плюма как плотностного течения зимой и весной под морским льдом, т.е. в отсутствие ветрового воздействия. Таким образом, результаты этого исследования важны для понимания цикла пресной воды в Северном Ледовитом океане в зимне-весенний период.

Исследование профинансировано Российским научным фондом, исследовательский проект 22-27-00552.

Список литературы

- 1) Marshall J., Schott F. Open-ocean convection: Observations, theory, and models // *Reviews of Geophysics*. – 1999. – Vol. 37. – №. 1. – P. 1-64.
- 2) Landau L. D., Lifshitz E. M. *Fluid Mechanics. Course of Theoretical Physics, Volume 6.* – Elsevier, 2013.
- 3) Brickman D. Heat flux partitioning in open-ocean convection // *Journal of Physical Oceanography*. – 1995. – Vol. 25. – №. 11. – P. 2609-2623
- 4) Canuto V. M. et al. Modeling ocean deep convection // *Ocean Modelling*. – 2004. – Vol. 7. – №. 1-2. – P. 75-95

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ВЕТРОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЯМИ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В РЕГИОНЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В ОСЕННИЙ ПЕРИОД

Захарова Е.В.¹, Ладохина Е.М.², Попов С.К.³, Фомин В.В.¹, Дианский Н.А.¹

¹Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Москва

²МикроСтеп-МИС, Санкт-Петербург

³Гидрометцентр России, Москва

Ключевые слова: Балтийское море, численное моделирование, атмосферная циркуляция, штормовой нагон, прогноз ветра.

Нередко прохождение глубоких циклонов над Балтийским регионом может приводить к возникновению сгонно-нагонных колебаний [1], которые могут вызывать существенное повышение уровня моря и наводнения вблизи Санкт-Петербурга. Благодаря своевременному прогнозу повышения уровня выше отметки 160 см по балтийской системе и наличию у Санкт-Петербурга комплекса защитных сооружений (КЗС) удастся предотвращать наводнения. Своевременность закрытия створов КЗС в большой степени зависит от точности прогнозов уровня моря моделями морской циркуляции. Качество прогнозов уровня моря во многом определяется точностью данных для задания атмосферного воздействия, к которым относятся зональная и меридиональная компоненты ветра. Поэтому с целью выявления моделей, которые с наибольшей точностью прогнозируют скорости и направления ветра, было проведено сопоставление рядов данных моделей атмосферной циркуляции GFS, WRF, COSMO-RU07, HIRLAM с данными наземных наблюдений. Поскольку интерес представляет воспроизведение ветровых условий, при которых возможно формирование штормового нагона, были рассчитаны оправдываемости прогнозов и проведен анализ статистических данных для ветров со скоростями не менее 4 м/с, то есть из рассмотрения были исключены штилевые ветры. В работе рассмотрен период с 01.09.2019 по 30.10.2019 гг., в течение которого дважды Северо-западным УГМС в Санкт-Петербурге прогнозировался уровень моря превышающий 160 см. Оба наводнения были успешно предотвращены благодаря закрытию КЗС.

В работе использовались расчеты зональной и меридиональной компонент ветра один раз в сутки в срок 00 UTC с заблаговременностью 24 ч и дискретностью 3 часа четырех прогностических моделей атмосферной циркуляции. Одна из рассмотренных моделей глобальная – это спектральная полулагранжева модель GFS (Global Forecast System) с горизонтальным разрешением $0.5 \times 0.5^\circ$ (~50 км) и 64 уровнями по вертикали, результаты расчета доступны для скачивания на сайте национального центра прогнозирования (NCEP). Три другие модели являются мезомасштабными региональными: COSMO-RU07 (the Consortium for Small-scale Modelling) [2] – модель гидродинамических прогнозов погоды по европейской части России имеет 40 уровней по вертикали и размер области 620×700 узлов с горизонтальным разрешением 7 км; WRF (Weather Research and Forecasting Model) [3] – гидродинамическая модель, адаптированная для акватории Балтийского моря, имеет 35 неравномерно распределенных уровней по вертикали и размером области 329×329 узлов с горизонтальным разрешением 10×10 км; а также HIRLAM – модель с разрешением 7.5 км, описание и оперативные расчеты (до октября 2022 года) которой доступны на сайте Финского метеорологического института.

Сравнение осуществлялось с данными о скоростях и направлениях ветра наземных наблюдений по 129 метеорологическим станциям вокруг Балтийского моря, взятыми с сайта Национального центра климатических данных (NCDC) за сроки 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC. Оценка точности прогноза скорости и направления ветра осуществлялась согласно методике из [4], согласно которой прогноз по пункту считается оправдавшимся, если фактическая скорость ветра отличается от

прогнозируемого значения не более чем на 2 м/с, а фактическое направление ветра – не более чем на 30°. Поскольку наземные станции наблюдения расположены не равномерно на побережье Балтийского моря было выделено 3 района: I – основная акватория Балтийского моря, включая Датские проливы (70 станций), II – Финский залив (24 станций) и III – Ботнический залив (35 станций). Оправдываемость прогнозов по станциям осреднялась по каждому району, а также для всех 129 станций.

Прогнозы модели COSMO-RU07 обладают наиболее высокой из рассмотренных моделей средней оправдываемостью скоростей ветра выше 4 м/с и составляет 71% для всей акватории Балтийского моря. Наименьшие значения оправдываемости скорости ветра характерны для глобальной модели GFS, пространственное разрешение которой уступает мезомасштабным моделям. Средняя оправдываемость направлений ветра при скоростях 4 м/с и более составляет от 56% по модели HIRLAM до 60% по модели GFS для II района и от 46% по модели COSMO-RU07 до 50% по модели HIRLAM для III района оправдываемости различается незначительно. по модели COSMO-RU07 составляет 62%, что ниже приблизительно на 10% по сравнению с другими моделями в I районе.

Анализ оправдываемости прогнозов направления ветра показал, что имеется значительная пространственная неоднородность: прогнозы в III районе оправдываются значительно реже, чем в I районе, однако для оправдываемости скоростей ветра такой особенности не прослеживается. Возможно, так происходит из-за особенностей расположения станций, различий рельефа местности в северной и южной части Балтийского моря.

Сравнение модельных прогнозов ветровых характеристик с данными наземных наблюдений по данным 129 станций за период 01.09-30.10.2019 гг. показало, что модель COSMO-RU07 воспроизводит скорость ветра на первые сутки прогноза с наибольшей точностью, а модель HIRLAM и WRF – направление ветра.

Список литературы

- 1) Захарчук Е.А., Тихонова Н.А., Сухачев В.Н. О пространственной структуре и распространении волн невыхских наводнений // Метеорология и гидрология, 2020, № 4, с.42-53
- 2) Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В. Мезомасштабная модель COSMO-RU07 и результаты ее оперативных испытаний // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов, 2012, № 39, с.15-48
- 3) Skamarock W. C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X., Wang W. and Powers J.G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. University Corporation for Atmospheric Research, 2008, pp.125. doi:10.5065/D68S4MVH
- 4) Наставление по краткосрочным прогноза погоды общего назначения (РД 52.27.724-2019). – Москва: ФГБУ «Гидрометцентр России», 2019, - 59 с.

ПОТОК АНТАРКТИЧЕСКОЙ ДОННОЙ ВОДЫ НА ВЫХОДЕ ИЗ КАНАЛА ВИМА

Зуев О.А., Селиверстова А.М.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Антарктическая донная вода, канал Вима, абиссальный поток, профили температуры и скорости, кремний.

Климат Земли во многом определяется циркуляцией океана, важным компонентом которой является Глобальный океанский конвейер (ГОК), связывающий термоклин и абиссаль. Нижняя глубинная ветвь ГОК имеет антарктическое происхождение – наиболее плотные воды образуются в нескольких районах Южного океана и далее распространяются в придонном слое на большую часть акватории Мирового океана как Антарктическая донная вода (ААДВ, согласно [1] верхняя граница проходит по изотерме потенциальной температуры в 2°C). Канал Вима является главным путем попадания ААДВ из Аргентинской котловины в Бразильскую. В самом канале проводится множество исследований, в частности на главной седловине для наблюдения за почти 40-летним трендом на увеличение минимальной температуры воды, проходящей через канал, однако до сих пор нет точного представления картины потоков ААДВ на выходе из канала в месте его перехода в Бразильскую котловину.

В 2020 и 2022 гг. были проведены два рейса в Антарктиду на НИС «Академик Мстислав Келдыш» (АМК79, АМК87) с попутными работами в канале Вима. Было выполнено 49 и 14 гидрофизических станций с измерениями температуры, солености и скорости течений (CTD/LADCP), также на многих станциях были выполнены измерения гидрохимических показателей, в частности кремний и кислород. Обработка данных производилась стандартными методами: для CTD программным пакетом SbeDataProcessing; для LADCP программным пакетом LDEO Software version IX.10 [2] с дополнительным учетом приливных сил с помощью программного обеспечения, описанного в [3]; гидрохимических показателей в соответствии с методиками, принятыми в современной гидрохимии [4].

Известно, что в канале Вима существуют два потока ААДВ: нижний проходит по самой глубокой и узкой части канала и формируется продольным градиентом давления накапливающейся абиссальной воды в Аргентинской котловине, а верхний удерживается геострофическим балансом над западной террасой канала, располагаясь на 300-400 метров выше нижнего [5]. Ядра обоих потоков несут воду с потенциальной температурой меньше 0.2°C . На стандартном разрезе (вдоль $31^{\circ}12'$ ю.ш.) выполненным в 2020 г. также наблюдались оба этих ядра с минимальными потенциальными температурами -0.11°C и -0.06°C , скорости течений достигали 25 см/с .

Одной из задач рейса 2020 г. являлось изучение поведения обоих струй ААДВ на выходе из канала Вима – в районе $26^{\circ}30'$ ю.ш., $34^{\circ}30'$ з.д. Были выполнены два поперечных разреза, на каждом из которых обнаружены ядра ААДВ с $\theta < 0.2^{\circ}\text{C}$ и значительными скоростями течений в северо-восточном направлении – до 20 см/с и 12 см/с в нижнем и верхнем потоках соответственно. При этом нижнее ядро было расположено у самого дна на глубинах 4700-4800 м, а верхнее выше дна на 150 м на глубинах 4100-4200 м; таким образом расстояние между ядрами составляло около 600 м. Нижняя ветвь течения больше направлена на восток, тогда как верхняя на север. Основываясь на предыдущих измерениях, а также исторических данных, можно предположить, что нижний поток не может преодолеть значительную возвышенность на $33^{\circ}30'$ з.д. и перед ней также поворачивает на север по двум узким каналам. При этом оба канала доходят лишь до 26° ю.ш., где наблюдается последние потенциальные температуры ниже нуля, далее придонная потенциальная температура резко возрастает. Таким образом наиболее холодные воды ААДВ могут попадать в Бразильскую котловину только западнее – по верхнему потоку.

В 2009, 2018 гг. британскими учеными был выполнен повторяющийся STD-разрез по 24° ю.ш. Оба раза на разрезе были обнаружены две струи с низкими придонными потенциальными температурами: от -0.04°C до -0.05°C на 33°50' з.д. (приблизительно на глубине 4650 м) в первой; и от -0.03°C до -0.04°C на 31°25' з.д. (в диапазоне глубин 5000-5200 м) во второй. Вероятно, что области относительно холодной придонной температуры могут быть связаны с продолжением верхнего течения донной воды из канала Вима.

В рейсе 2022 г. был выполнен более протяженный разрез в том же районе. Основной целью была проверка гипотезы о наличии еще одной струи ААДВ, расположенной выше по склону, а также подтверждение предыдущих результатов. Благодаря учащенной схеме станции и обновленной базе рельефа дна удалось обнаружить воду с $\theta < 0.2^\circ\text{C}$ на глубинах до 4200 м. Были выделены три ядра – в самом канале (-0.03°C, 4700 м), в начале склона в точке обнаружения верхней струи в 2020 г. (0.04°C, 4400 м) и еще западнее (35°12' з.д., 25°53' ю.ш., 0.08 °C, 4200 м). Во всех потоках скорости течений были направлены преимущественно на север, северо-восток и достигали 20 см/с, 12 см/с и 15 см/с соответственно. Данные потоки также отличались повышенным содержанием кремния и пониженными кислорода. Таким образом можно предположить, что оба ядра холодной воды, обнаруженной на 24° ю.ш., принесены двумя верхними потоками, расположенными над западной террасой канала Вима, распространяясь по изобатам 4200-4400 м одна и заглубляясь до 5000 м вторая.

Основными итогами исследований являются: продолжение наблюдений за изменением температуры на главной седловине канала Вима; подтверждение и уточнение расположения и мощности основного и верхнего потоков ААДВ; нахождение и подтверждения существования третьего потока ААДВ, проходящего еще западнее, вероятно по изобате 4000-4200 м.

Сбор и анализ данных выполнен при поддержке гранта РФФ 21-77-20004.

Список литературы

- 1) Wüst G. Schichtung und Zirkulation des Atlantischen Ozeans, Das Bodenwasser und die Stratosphäre / Wüst G. // Wissenschaftliche Ergebnisse, Deutsche Atlantische Expedition auf dem Forschungs - und Vermessungsschiff “ 1925-1927, 6(1)., Berlin: Walter de Gruyter & Co. 1936. P. 411.
- 2) Visbeck M. Deep velocity profiling using lowered acoustic Doppler current profilers: Bottom track and inverse solutions / Visbeck M. // Journal of atmospheric and oceanic technology. 2002. Vol. 19. № 5. P. 794-807
- 3) Egbert G. D. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides / Egbert G. D., Erofeeva S. Y. // Journal of Atmospheric and Oceanic technology. 2002. Vol. 19. № 2. P. 183-204
- 4) Бордовский О. К. Современные методы гидрохимических исследований океана : метод. пособие / Бордовский О. К., Чернякова А. М. – М.: ИО РАН, 1992. – 200 с.
- 5) Morozov E. G. Flow of Antarctic bottom water from the Vema Channel / Morozov E. G., Frey D. I., Tarakanov R. Y. // Geoscience Letters. 2020. Vol. 7. № 1. P. 1-9

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИИ MOSAIC

Иванов К.Д.^{1,2}, Смирнов В.Н.¹, Знаменский М.С.¹

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, поверхностные гравитационные волны, экспедиция MOSAIC, мониторинг состояния льда, спектры Фурье, вейвлет-преобразование.

Ледяной покров Северного Ледовитого океана принято рассматривать как динамическую среду, которая во многом обусловлена процессами взаимодействия океана и атмосферы. Таким образом, морские льды являются одним из важнейших факторов, влияющих на климат Земли [1]. Именно поэтому, к климатическим процессам, протекающим в данный момент в Арктическом регионе приковано большое внимание научного сообщества. С целью изучения динамических процессов во льду проводятся регулярные наблюдения и исследования, а также, организуются экспедиции. Одной из таких экспедиций являлась экспедиция MOSAIC (Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate). Экспедиция представляла собой междисциплинарную дрейфующую обсерваторию, работавшую в Центральной Арктике в период 2019-2020 годов [2].

В дрейфующих и припайных льдах Арктики наблюдаются колебательные процессы в широком диапазоне амплитуд смещения и периодов колебаний. В одних случаях это вертикальные движения льда, подобно колебаниям поплавка на воде, в других — это волновой процесс, простейшим примером которого являются волны зыби, взаимодействующие со льдом, возникающие при этом вынужденные изгибные деформации льда в системе лед—вода образуют свободные поверхностные гравитационные волны. Весь диапазон волн с периодом от 1 сек до 30 сек называют изгибно-гравитационными волнами. Циклические напряжения, вызываемые волной зыби, могут накладываться на уже имеющиеся внутренние напряжения, т.е. могут служить спусковым механизмом, приводящим либо к мгновенному разлому ледяного покрова, либо к релаксации внутренних напряжений за счет образования множества микротрещин. Перевес в ту или иную сторону будет определяться параметрами волн и уровнем внутренних напряжений во льду.

В системе морской лед-вода могут происходить динамические процессы, связанные с механическим деформированием ледяных полей и их разрушением. Причиной этого могут быть различные гидрометеорологические условия. Все эти процессы со льдом принято называть динамическими событиями. Работа заключалась в выполнении предварительного анализа некоторых динамических событий в ледяном покрове в районе проведения натурных исследований. В качестве рассматриваемого периода был выбран временной интервал с 28 февраля по 7 марта 2020 года включительно. Такой выбор временного интервала связан с тем, что он ранее не подвергался подобному анализу в работах других авторов. Основной целью работы было описание наиболее значительных динамических событий, произошедших в районе работы дрейфующей обсерватории за вышеуказанный временной промежуток.

В качестве исходных данных были использованы данные трех сейсмостанций, расположенных на небольшом удалении друг от друга и образующих треугольник. Исходный аналоговый сигнал представлял собой напряжение в (V) от сейсмометров, измеряющих скорости смещения в трех координатах. Далее, были построены спектры колебательных и волновых процессов при помощи метода «быстрого преобразования Фурье» (БПФ). Также, в ходе работы были построены спектрограммы колебательных и волновых процессов в ледяном покрове с использованием метода непрерывного вейвлет-преобразования (CWT). Для получения представлений о возможных причинах происхождения того или иного события были проанализированы временные изменения

основных метеорологических характеристик в зоне постановки эксперимента за рассмотренный временной период.

В результате работы получены временные ходы вертикальных и горизонтальных колебаний дрейфующего льда для каждой из трех станций эксперимента за период с 28 февраля по 7 марта 2020 года, а также метеопараметры за аналогичный период.

Таким образом, данная работа, в целом, является закономерным продолжением исследований, выполненных авторами работы [3].

Исходные натурные данные по динамике льда получены сотрудниками ААНИИ в рамках международной многопрофильной дрейфующей обсерватории по изучению арктического климата (MOSAiC) с пометкой MOSAiC20192020. Идентификатор экспедиции AWI_PS122 00.

Результаты данной работы были получены в рамках темы 5.1.5 ЦНТП Росгидромета «Исследование крупномасштабной динамики, физических процессов, механики деформирования и разрушения морских льдов с целью совершенствования методов краткосрочного прогнозирования сжатия и торошения».

Список литературы

- 1) Смирнов В.Н. Динамические процессы в морских льдах // 1996. Санкт-Петербург. Гидрометеоздат. С. 4
- 2) Колабутин Н.В., Шейкин И.Б., Шиманчук Е.В., Ньюбом А.А. Научно-технический отчет о работах, выполненных в рамках программы ледоисследовательских работ (стандартные ледовые наблюдения) на ДС «MOSAiC CO» в рамках экспедиции MOSAiC, в период с 20.09.2019 по 12.10.2020 // 2021
- 3) Смирнов В.Н., Знаменский М.С., Шейкин И.Б. Волновые процессы в дрейфующем льду Северного Ледовитого океана в экспедиции MOSAiC. Зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. No 1. С. 26 — 47

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ПРОЛИВЕ БЪЕРКЕЗУНД ЗА ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2022 Г.

Игнатьев Д.Е., Татаренко Ю.А., Фролова Н.С.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: судовые наблюдения, структура вод, пролив Бьеркезунд, Балтийское море.

Пролив Бьеркезунд находится в Финском заливе Балтийского моря, расположен между материком и полуостровом Киперорт и Березовыми островами. Исследовательские работы в указанном регионе являются продолжением цикла работ о структуре вод в проливе Бьеркезунд.[3] Полученные данные впоследствии будут использованы для составления и уточнения гидродинамических моделей пролива и акватории Финского залива. К тому же, данные могут потребоваться и для оценки воздействия местного портового комплекса на экосистему пролива.

В качестве исходных данных использовались судовые измерения температуры, солёности, плотности, а также растворенного кислорода, полученные в рамках гидрологических исследований, проведенных в проливе Бьеркезунд с 16.06.22 по 29.06.22 на 44 станциях. Авторы провели систематизацию, анализ и обработку полученных данных. Исследования термохалинной структуры воды проводились посредством выполнения STD-зондирования с помощью STD-зонда SBE 19 plusV2 фирмы SeaBird Electronics Inc. (США).

В июне поверхностное распределение температуры имеет диапазон изменения значений 11-20°C, максимальные наблюдаются на юго-востоке пролива, а минимальные – в середине, на широте 60.4°с.ш., у берегов Северного Березового острова и материка, в других областях 16-18°C. С глубиной распределение меняется. На горизонте 10 метров минимальные значения – только у берега острова с понижением значений до 2°C, а максимальные значения в той же области с понижением значений до 17°C, в остальных областях диапазон значений 10-13°C.

Распределение солёности повторяет температурное. В июне поверхностное распространение солёности варьируется в диапазоне значений 1.4 – 2.8 ‰, повышенные значения, так же как и минимальные температурные, отмечаются, в середине, на широте 60.4°с.ш., у берегов Северного Березового острова и материка. На горизонте 10 метров диапазон значений – 2-4 ‰, повышенные значения - на той же параллели только у берегов острова около 4‰.

Плотность в среднем составляет 0.5 кг/м³ – на поверхности и 1.5 кг/м³ – на глубине 10 м. Наибольшие значения 1.8 кг/м³ зафиксированы на поверхности и наблюдаются на параллели 60.4°с.ш. у обоих берегов. На горизонте 10 м на той же широте у берега острова отмечаются значения плотности в районе 3 кг/м³. Наименьшая плотность на поверхности равна 0. Такая ситуация наблюдается в середине пролива и южнее параллели 60.35°с.ш. вплоть до открытой части Финского залива. На горизонте 10 м минимальное значение равно 1 кг/м³, наблюдается в 3 областях: севернее параллели 60.45°с.ш. у берега материка, в центральной части пролива и в юго-восточной его части.

Распределение кислорода в проливе на поверхности варьируется в пределах от 7.7 мл/л до 10.6 мл/л, и в среднем составляет 9.1 мл/л. С глубиной концентрация растворенного кислорода уменьшается от 9.6 до 7,3 мл/л, и в среднем составляет 8.4 мл/л. Согласно классификации А.А. Былинкиной и С.М. Драчева по показателю растворенного кислорода качество воды на поверхности в основном соответствует I классу (очень чистые воды), на глубине – II классу (чистые воды) [1, 2].

В северной и южной частях пролива термоклин, галоклин и пикноклин наблюдаются на глубине 13-15 м, а в центральной части залегают на глубине 7-8 м.

Список литературы

- 1) Былинкина А.А., Драчев С.М., Ицкова А.И. О приемах графического изображения аналитических данных о состоянии водоема // Мат. 16-го совещания Гидрохим. ин-та АН СССР. – Новочеркасск: АН СССР, 1962. – С. 8–18.
- 2) Драчев С.М. Борьба с загрязнением рек, озер и водохранилищ промышленными и бытовыми стоками. – М.; Л.: Наука, 1964. – 271 с.
- 3) Нурлибаева А.С., Подrezова Н.А. Распределение гидрологических и гидрохимических характеристик в проливе Бьеркезунд за летний период 2018-2019 гг // Комплексные исследования мирового океана. Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых. Москва. 2021.

ВЕРИФИКАЦИЯ 1,5D-МОДЕЛИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА ПО ДАННЫМ ЗОНДИРОВАНИЙ 122 РЕЙСА НИС "ПРОФЕССОР ВОДЯНИЦКИЙ"

Казаков Д.А., Павлов М.И., Чухарев А.М.

ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь

Ключевые слова: Черное море, диссипация энергии, стратифицированные слои, вертикальный турбулентный обмен, частота плавучести, измерительный комплекс, натурные измерения, модели турбулентного обмена, полутримерная модель.

В последние десятилетия повысилась актуальность решения научных и практических задач в области прогнозов состояния экосистем океанов и морей. Одним из ключевых подходов к выявлению закономерностей изменения состояния морских систем является развитие моделей турбулентного обмена на основе современных высокоточных измерений. Эти модели в дальнейшем находят применение в прогностических моделях климата, эволюции гидрологической структуры, биологических систем и т.д. Целью данной работы является попытка выявления закономерностей, определяющих вертикальную структуру гидрофизических полей и интенсивность перемешивания, на базе известных полуэмпирических подходов к определению турбулентного режима в стратифицированных слоях Черного моря.

Для решения такого рода задач в ФИЦ МГИ проводятся регулярные экспедиционные исследования. В результате проведенных экспериментальных измерений в 122-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» с 7 июня по 2 июля 2022 г. были собраны данные в северной части Черного моря в пределах экономической зоны РФ. Впервые получена подробная информация не только об основных гидрологических величинах, но и о пульсационных характеристиках потока в стратифицированных слоях Черного моря наряду с данными о вертикальном распределении кислорода, хлорофилла А и мутности вплоть до глубин свыше 900 м. Съёмка данных осуществлялась новым микроструктурным зондом MSS-90L.

Исследования в данном регионе предусматривали получение зависимостей коэффициента вертикальной турбулентной диффузии K от частоты плавучести N и от глубины z по пульсационным характеристикам потока в верхнем стометровом слое моря и сравнении их с результатами 1,5D-модели вертикального турбулентного обмена [1,2], а также общий анализ гидрофизических особенностей исследуемого региона. Анализ данных показал наличие нескольких слоев с различными характерными особенностями перемешивания в них. Полученные степенные аппроксимации зависимостей $K \propto N^\alpha$ в этих слоях показали хорошую сходимость с модельными в степенной части. Дальнейшие исследования позволят улучшить параметризацию модели вертикального турбулентного обмена в стратифицированных слоях и достигнуть лучшего понимания процессов вертикального обмена теплом, солями, биогенными элементами и их зависимость от интенсивности турбулентности.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ №22-17-00150 (шифр «Турбулентная структура»).

Список литературы

- 1) Самодуров, А. С. Основные закономерности вертикального турбулентного обмена в квази-однородных и стратифицированных слоях Черного моря / А. С. Самодуров, А. М. Чухарев, Д. А. Казаков // Морской гидрофизический журнал. – 2021. – Т. 37. – № 4(220). – С. 405-422. – DOI 10.22449/0233-7584-2021-4-405-422. – EDN MGYDHW

2) Самодуров, А. С. Стационарная модель вертикального обмена в черном море для реальной геометрии бассейна / А. С. Самодуров, О. Е. Кульша, В. Н. Белокопытов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2006. – № 14. – С. 517-523. – EDN ZBOAUJ.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЬДА НА ТЕМПЕРАТУРУ ВОЗДУХА В СЕВЕРО-ЕВРОПЕЙСКОМ БАССЕЙНЕ

Каледина А.С.^{1,2}, Башмачников И.Л.^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Северо-Европейский бассейн, потоки тепла, ледяной покров, температура воздуха, естественные ортогональные функции.

В условиях меняющегося климата важной задачей стоит изучение факторов, влияющих на увеличение температуры воздуха в арктическом регионе, а также на сокращение ледяного покрова [1]. Одной из причин изменения температуры воздуха в зимний период в Арктическом бассейне является теплоотдача океана [2]. Сокращение ледяного покрова способствует увеличению турбулентных потоков тепла из океана в атмосферу [3, 4].

В данной работе было проанализировано изменение температуры воздуха над Северо-Европейским бассейном за счёт изменения вертикальных потоков тепла из океана по данным атмосферного реанализа ERA5 за период 1959-2021 гг.

Практически во всей акватории Северо-Европейского бассейна, средняя за период анализа температура воды больше температуры воздуха и среднегодовые потоки не только скрытого, но и явного тепла направлены из океана в атмосферу. Наиболее высокие значения суммарной теплоотдачи океана в атмосферу наблюдаются в районе Норвежского моря и в западной части Баренцева моря, с максимальными значениями вдоль Западно-Шпицбергенского и Норвежского течений.

Межгодовая пространственно-временная изменчивость потоков тепла из океана в атмосферу раскладывалась на характерные моды изменчивости методом естественных ортогональных функций (ЕОФ). Суммарная дисперсия первых двух мод ЕОФ составляет 63%. Для объяснения механизмов формирования пространственно-временной изменчивости, проявляющихся в первых ЕОФ, искались корреляционные связи главных компонент (ГК) этих ЕОФ с различными атмосферными и океаническими индексами. Также формировались композитные карты полей скорости приземного ветра и атмосферного давления, для высоких и низких значений ГК. Критерием «высоких» или «низких» значений ГК служило отклонение более чем на одно стандартное отклонение от среднего значения временного ряда ГК.

Первая мода ЕОФ описывает 39% дисперсии потоков тепла из океана в атмосферу и характеризует общий тренд на потепление с 1970-х гг. Наибольшие значения ЕОФ1 наблюдаются в областях существенного уменьшения концентрации льда за последние 50 лет, где происходит устойчивый рост теплоотдачи из океана в атмосферу. Эти же области соответствуют областям наибольшего увеличения температуры воздуха за рассматриваемый период. ГК1 также имеет умеренно высокую корреляцию (0,65) с атмосферным индексом ЕАР (East Atlantic Pattern - Восточно-Атлантическая осцилляция), который характеризует вторую моду изменчивости атмосферного давления над Северной Атлантикой после NAO [5].

Вторая мода ЕОФ описывает 24% дисперсии потоков тепла из океана в атмосферу. При высоких положительных значениях ГК2 пространственная структура ЕОФ2 характеризуется усилением теплоотдачи в зоне западных ветров над субполярной Атлантикой при одновременном ослаблении теплоотдачи океаном в Норвежско-Гренландском регионе за счет ослабления здесь северных ветров. Изменчивость ГК2 показывает умеренно высокие и значимые корреляции (0,58) с индексом NAO. Вне зон отступления льда, наблюдавшегося в последние десятилетия, пространственная структура ЕОФ1 напоминает таковую для ЕОФ2, что позволяет предположить присутствие одного и того же механизма формирования этой изменчивости. Таким образом, ЕОФ1

имеет смешанное происхождение, объединяя тенденции глобального потепления, проявляющиеся как в отступлении льда, так и в изменении характера атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой и Северо-Европейским бассейном.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта СПбГУ № 94033410.

Список литературы

- 1) Семенов В. А. Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, №. 1. С. 21-33
- 2) Alexeev V. A., Walsh J. E., Ivanov V. V., Semenov V. A., Smirnov A. V. Warming in the Nordic Seas, North Atlantic storms and thinning Arctic sea ice // Environmental Research Letters. 2017. Vol. 12, iss. 8. P. 1-14
- 3) Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H. The role of Atlantic heat transport in future Arctic winter sea ice loss // Journal of Climate. 2019. Vol. 32, iss. 11. P. 3327-3341
- 4) Матвеева Т. А., Семенов В. А., Астафьева Е. С. Ледовитость арктических морей и ее связь с приземной температурой воздуха в Северном полушарии // Лед и снег. 2020. Т. 60, № 1. С. 134–148
- 5) Woollings T., Hannachi A., Hoskins B. Variability of the North Atlantic eddy-driven jet stream // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2010. Vol. 136, iss. 649. P. 856-868

КОМБИНАЦИЯ ЛАГРАНЖЕВА ПОДХОДА И МЕТОДОВ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПЕРЕНОСА ВОД (НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ОХОТСКОГО МОРЯ)

Кивва К.К.¹, Будянский М.В.², Пранц С.В.²

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Москва

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: адвекция, лагранжесв подход, полигон, мультиполигон, выпуклая оболочка, выпуклость, заток тихоокеанских вод, индекс.

Подходы к описанию сплошных сред и, в частности, наблюдению за движениями воды в океане разделяют на два класса. Эйлеров подход соответствует наблюдениям в фиксированной точке (точках) физического пространства. В океанологии примерами таких наблюдений служат измерения заякоренных буёв и судов, в том числе океанографические съёмки. Лагранжесв подход связан с привязкой наблюдений к частицам жидкости и отслеживанием их перемещений. С некоторыми допущениями пример такого подхода – измерения, выполняемые с помощью дрейфующих буёв. В теоретической термогидродинамике описания среды с помощью этих подходов эквивалентны. Накопление данных и развитие вычислительных машин в последнее время привело к созданию массивов данных (эйлеров подход) о течениях Мирового океана, имеющих достаточно высокое разрешение для того, чтобы перейти к анализу траекторий движения отдельных «частиц» (лагранжесв подход). К таким массивам, в частности, можно отнести данные по течениям, полученные с помощью спутниковой альтиметрии или математического моделирования. Использование лагранжесв подхода позволяет следить за переносом взвеси в морской среде и применяется во многих океанологических задачах для трассировки загрязнителей и планктона.

В частности, лагранжесв подход использован в исследовании связи распределения тралений на промысле минтая в Охотском море с происхождением вод [1]. В ходе работы получена информация о пересечении «частицами» воды, регулярно распределёнными по широте и долготе (шаг $0,038^\circ \times 0,054^\circ$ по широте и долготе), условного разреза вдоль Курильских островов. Расчёты выполнены назад по времени на 1095 дней. Информация получена для каждого дня в интервале с 31.01.1997 по 17.04.2022. Для каждой «частицы», траектория движения которой в течение 1095 дней до наблюдения пересекала выбранный условный разрез, зафиксирована дата и место пересечения разреза (в частности, долгота; далее – ДП), рассчитано время между датой пересечения разреза и датой наблюдения – время путешествия «частицы» в Охотском море на момент наблюдения (ВП). Факт пересечения траекторией «частицы» разреза трактовался как попадание «частицы» из Тихого океана в Охотское море.

«Частицы», относительно недавно поступившие из океана в море (до 150 дней), формируют пятна вод, размеры, форма и расположение которых существенно меняются. Предварительный визуальный анализ показал, что заток тихоокеанских вод в море характеризуется сезонными эпизодами усиления, после которых воды тихоокеанского происхождения распространяются вдоль западного побережья Камчатки. Помимо сезонной изменчивости этого процесса, естественно, наблюдается более короткопериодная и длиннопериодная (например, синоптическая и межгодовая) изменчивость. Для описания этой изменчивости разработан новый подход. Для каждого дня с наблюдениями выполнены следующие операции. Выбраны частицы внутри области $45\text{--}56^\circ$ с. ш., $150\text{--}158^\circ$ в. д., попавшие в море из океана не более чем за 400 дней до даты наблюдения. Определены моды ВП, для каждой моды вычислены значение и плотность вероятности. Выбраны 5 наиболее

крупных кластеров «частиц» в пространстве ВП-ДП. То есть, анализ сосредоточен на пятнах вод, сформированных «частицами», относящимися к одним эпизодам усиления затока вод. Для группировки использован метод кластерного анализа DBSCAN, основанный на плотности объектов в рассматриваемом пространстве (в нашем случае – пространство координат ВП-ДП). Таким образом, малые группы, представляющие собой отражение эпизодов поступления незначительного количества тихоокеанской воды в море, исключены из дальнейшего анализа. Ячейки, соответствующие «частицам» из выбранных групп, объединены в полигоны (мультиполигоны), для каждого из которых определена выпуклая оболочка (convexhull, VO) и рассчитаны: максимальная протяженность (диаметр окружности, описанной вокруг полигона), площадь, периметр, координаты центроида, площадь VO, медианы и квантили ВП и ДП. Отношение площади полигона к площади VO [2], а также максимальной протяженности полигона к его периметру отражают степень растекания тихоокеанских вод в море (чем больше мелких фрагментов вод, поступивших за один эпизод, и чем дальше они друг от друга, тем эти отношения меньше). Все полученные параметры предлагается использовать в качестве индексов, описывающих особенности распространения тихоокеанских вод в Охотском море. Дальнейший анализ полученных данных позволит выбрать наиболее удобные индексы и доработать алгоритм их расчёта.

Список литературы

- 1) Будянский М.В., Кулик В.В., Кивва К.К., Улейский М.Ю., Пранц С.В. Лагранжев анализ тихоокеанских вод в Охотском море на основе спутниковых данных в приложении к промыслу минтая // Исследование Земли из космоса. 2022. № 5. С. 47-59
- 2) Zunic J., Rosin P.L. A new convexity measure for polygons // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2004. 26(7). P. 923-934

ВЫЯВЛЕНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОД ТИХООКЕАНСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ОХОТСКОМ МОРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАГРАНЖЕВА ПОДХОДА

Кивва К.К.¹, Будянский М.В.², Пранц С.В.²

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Москва

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: адвекция, пассивная примесь, траектория движения, изменчивость, центроид, индекс распространения тихоокеанских вод.

Лагранжев подход к описанию сплошных сред в океанологии используется, в частности, для отслеживания перемещения пассивной взвеси. Это позволяет определять происхождение вод, анализировать распространение загрязнений и перенос планктонных организмов. Например, такой подход использован в работе, посвящённой оценке связи расположения результативных тралений на промысле минтая в Охотском море с распределением вод, поступивших в море из Тихого океана через проливы Курильской островной дуги [1]. В этой работе выполнен анализ происхождения регулярно распределённых по широте и долготе ($0,038^\circ \times 0,054^\circ$) «частиц» воды для каждого дня в интервале 1997–2021 гг. Для каждой «частицы» проводился расчёт траектории движения назад по времени на 1095 дней на основе данных по течениям, полученных с помощью спутниковой альтиметрии (разрешение $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ по широте и долготе). На каждом шаге расчёта для каждой «частицы» выполняли бикубическую пространственную интерполяцию компонент течения. Методы расчёта подробно описаны в [1]. В результате для указанных лет получены ежедневные данные, описывающие распределение в Охотском море широтно-долготных ячеек, воды которых имеют тихоокеанское происхождение. Такая информация позволяет решить широкий круг задач, касающихся особенностей залива и распространения вод Тихого океана в Охотское море. В данной работе предпринята попытка охарактеризовать временную изменчивость этого явления.

В качестве индекса распространения тихоокеанских вод в море использованы координаты центроида области, занятой водами тихоокеанского происхождения. Для учёта схождения меридианов в северном направлении расчёт выполняли в равноплощадной проекции Ламберта. Для выявления долгопериодной изменчивости, полученные временные ряды координат центроида аппроксимировали ядерной регрессией Надарая-Ватсона. Воды тихоокеанского происхождения поступают в море, главным образом, через проливы северной части Курильской островной дуги. Процесс их поступления имеет явно выраженную сезонность. Поэтому в данной работе анализ ограничен водами в интервале $50\text{--}56^\circ$ с. ш., $150\text{--}158^\circ$ в. д., которые провели в море от 30 до 180 дней. То есть, анализируется распространение вод, относительно недавно поступивших в море.

Центроид области, сформированной в Охотском море ячейками, соответствующими водам тихоокеанского происхождения с временем нахождения в море от 30 до 180 дней, всегда располагался в пределах $50,2\text{--}52,9^\circ$ с. ш., $151,4\text{--}154,8^\circ$ в. д.. Временной ход широты центроида характеризуется максимумом в весенне-летнее время (максимальное распространение вод тихоокеанского происхождения на север) и минимумом в начале зимы. Наибольшая амплитуда колебания широты центроида наблюдалась в 1998, 2003, 2010, 2013 и 2017 гг. В эти же годы, а также в 2019 г., тихоокеанские воды распространялись наиболее далеко на север. Годы с наименьшим распространением их в северном направлении – 2001, 2002, 2007, 2008, 2018.

Во временном ходе долготы центроида сезонность выражена менее ярко. Большинство исследованных лет имеет максимум долготы в зимнее время (воды тихоокеанского происхождения располагаются ближе к Камчатке). Такая особенность была слабо выражена в течение зимних

сезонов 1999/2000, 2007/2008, 2013/2014, 2017/2018, 2019/2020. Вероятно, в эти годы наблюдались какие-либо события, препятствующие характерному распространению тихоокеанских вод в море.

Наиболее близко к побережью Камчатки воды тихоокеанского происхождения располагались в зимние сезоны 1998/1999, с 2001 по 2004, с 2009 по 2013, а также 2016/2017 и 2018/2019.

Продолжением работы послужит анализ причин изменчивости залива тихоокеанских вод в Охотское море и поиск её влияния на биоту, в том числе на коммерчески значимые виды водных биологических ресурсов.

Список литературы

- 1) Будянский М.В., Кулик В.В., Кивва К.К., Улейский М.Ю., Пранц С.В. Лагранжев анализ тихоокеанских вод в Охотском море на основе спутниковых данных в приложении к промыслу минтая // Исследование Земли из космоса. 2022. № 5. С. 47-59

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ВОД ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ СУБАРКТИЧЕСКОЙ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ ТИХОГО ОКЕАНА ВЕСНОЙ 2022 ГОДА

Кивва К.К.¹, Чульचेков Д.Н.², Сомов А.А.²

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Москва

² Тихоокеанский филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Владивосток

Ключевые слова: T,S-диаграмма, водные массы, термохалинная структура, гидрохимическая структура, субарктическая фронтальная зона, субарктический фронт.

Субарктическая фронтальная зона (САФЗ) в океанах (Атлантическом и Тихом) разделяет воды умеренной зоны и субарктического круговорота, отличающиеся вертикальной структурой. В Тихом океане (ТО) САФЗ протягивается от побережья Японских островов до западного побережья Северной Америки. В этой зоне исчезает холодный промежуточный слой, характерный для вод субарктического круговорота, и наблюдаются области высоких градиентов температуры и солёности в верхних 200 м водной толщи [1, 2]. Комплексные судовые исследования САФЗ ТО сосредоточены, главным образом, в западной и восточной её частях. Центральная её часть реже становится объектом таких исследований, поскольку она удалена от крупных океанографических центров и имеет несколько меньшее прикладное значение по причине относительно низкой концентрации биологических ресурсов. Особенно мало исследований САФЗ ТО приходится на зимне-весеннее время, характеризующееся суровыми погодными условиями. Однако именно зимой в районе САФЗ ТО концентрируются тихоокеанские лососи (главным образом, горбуша, кета, нерка, кижуч, и чавыча) азиатского и американского происхождения – важные объекты промысла, о зимовке которых до сих пор мало известно [3, 4, 5]. В феврале–апреле 2022 года в ходе пяти параллельных рейсов выполнены комплексные исследования центральной и восточной части САФЗ ТО и прилегающих вод по программе Международного года лосося [6]. Главной целью исследований было изучение условий зимовки тихоокеанских лососей. Центральная часть САФЗ ТО исследована в марте 2022 года с борта НИС «ТИНРО». Цель этого сообщения – характеристика пространственной изменчивости вертикальной структуры вод центральной части САФЗ ТО в марте 2022 года на основе гидролого-гидрохимических данных.

Биологические и ихтиологические исследования на каждой станции сопровождалась океанографическими работами: СТД-зондированием водной толщи до 1000 м, отбором проб на стандартных горизонтах от поверхности до 1000 м для определения концентрации минеральных форм основных биогенных элементов (кремний, азот нитратов и нитритов, фосфор) и растворённого кислорода. Всего выполнено 32 комплексных океанографических станции. Для каждой пробы воды дополнительно рассчитан параметр N**, характеризующий отклонение концентрации азота нитратов от стехиометрически предсказанного значения.

Результаты позволяют заключить, что воды к югу от САФЗ ТО весной теплее в слое 0–600 м и менее солёные в слое 0–100 м, чем воды субарктического круговорота. Как и ожидалось, в них отсутствует холодный промежуточный слой. Они существенно отличаются концентрацией фосфатов (на 0,5–1 мкМ ниже по всему исследованному профилю). Для них также характерны близкие к нулю значения N** во всём слое 0–1000 м, в то время как воды субарктического круговорота имеют значения N** в диапазоне от –12 до –5 мкМ. Это может указывать на денитрификацию в водах субарктического круговорота. В водах умеренной зоны, по всей видимости, денитрификация либо не происходит, либо уравновешивается фиксацией азота.

Список литературы

- 1) Belkin I., Krishfield R., Honjo, S. Decadal variability of the North Pacific Polar Front: Subsurface warming versus surface cooling // *Geophysical Research Letters*. 2002. 29(9). 1351.
- 2) Roden G.I. Subarctic-subtropical transition zone of the North Pacific: large-scale aspects and mesoscale structure // NOAA technical report NMFS. 1991. 105, pp.1-38.
- 3) Кровнин А.С., Кивва К.К., Мурый Г.П., Сумкина А.А. Влияние климатических факторов на межгодовые колебания запасов камчатской горбуши в 2014-2020 гг. // *Вопросы рыболовства*. 2021. Т. 22, № 4. С. 35-45.
- 4) Myers K.W., Irvine J.R., Logerwell E.A., Urawa S., Naydenko S.V., Zavolokin A.V., Davis N.D. Pacific salmon and steelhead: life in a changing winter ocean // *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Bull.* 2016. No. 6. P.113-138.
- 5) Radchenko V.I. Winter Ecology of Pacific Salmon // *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Tech. Rep.* 2022. No. 18. P.1-8.
- 6) Somov A.A., Pakhomov E.A., Polyanichko V.I. How Many Salmon were in the North Pacific in Winter-Spring 2022? // *NPAFC Newsletter*. 2022. No. 52. P. 30-34.

МУЛЬТИ-СЕНСОРНЫЕ СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ОКЕАНСКИХ ВИХРЕЙ В ПРОЛИВЕ ФРАМА

Козлов И.Е.¹, Морозов Е.А.¹, Башмачников И.Л.^{1,2,3}, Петренко Л.А.¹

¹Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

³Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: океанские вихри, дистанционное зондирование океана из космоса, спектро-радиометр MODIS, спутниковая радиолокация, альтиметры, численное моделирование, пролив Фрама, Арктика.

В настоящей работе проводится анализ и сравнение результатов наблюдения океанских вихрей в проливе Фрама, полученных на основе различных источников информации. В основе исследования лежат недавние результаты анализа измерений MODIS Aqua в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра, которые далее сравниваются с результатами более ранних исследований – спутниковых радиолокационных измерений Envisat ASAR, альтиметрических измерений AVISO, а также модели FESOM высокого пространственного разрешения (1 км) [1, 2, 3].

Анализ и идентификация вихрей по данным MODIS проводилась в суточных полях температуры поверхности океана (ТПО) и концентрации хлорофилла-а (хл-а) за летние периоды (с апреля по октябрь) 2007, 2018-2020 гг. Суточные поля ТПО и хл-а формировались путем интерполяции всех доступных за день данных уровня L2 на регулярную сетку с разрешением 0,5 км и их дальнейшего осреднения. Для исключения влияния льда и облачности использовались стандартные маски из данных хл-а. В общей сложности в анализе использовано 15138 полей ТПО и 9902 полей хл-а за разные годы, из которых набралось 170 дней с относительно безоблачными условиями. Идентификация вихрей в полях ТПО и хл-а проводилась на основе визуального анализа и ручной идентификации осей вихрей, визуально определялся знак вращения вихрей. Далее автоматически для каждого вихря рассчитывались радиус вихрей, отношение их осей и координаты центра. После этого определялась аномалия значений ТПО и хл-а в вихрях относительно фоновых условий. Кроме того, для всех случаев наблюдения вихрей в последовательных изображениях за несколько дней подряд определялись траектории и скорости перемещения вихревых структур.

Всего по данным ТПО (хл-а) выявлено 450 (721) вихрей. Их радиусы составили от 2 до 40 км (в среднем 12 км). Большинство вихрей имеет эллиптическую форму со средним соотношением сторон их осей, равным $\sim 0,8$. Размеры циклонов, как правило, меньше антициклонов, они же преобладают в обоих источниках данных. Пик вихревой активности приходится на июнь, а данные по хл-а также имеют второй пик в апреле. В ТПО максимальная повторяемость вихрей обнаружена вдоль основной струи Восточно-Гренландского течения в районе Нордбукты ($76-78^\circ$ с.ш.), а также вдоль струи Западно-Шпицбергенского течения ($78-80^\circ$ с.ш.). По данным хл-а максимальная вихревая активность зарегистрирована между струями этих двух течений в проливе Фрама. Общее количество вихрей с положительной аномалией хл-а, чаще встречающейся в циклонах, больше (62%), чем с отрицательной ($\sim 38\%$). Количество вихрей с положительными и отрицательными аномалиями ТПО примерно равно. Скорость горизонтального перемещения вихрей составила 0,9-9,6 км/сут (среднее значение 4,2 км/сут). Результаты сопоставления полученных результатов с данными РСА, альтиметрии AVISO и модели FESOM будут представлены в докладе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 18-77-00082, <https://rscf.ru/project/21-17-00278>.

Список литературы

- 1) Bashmachnikov I.L., Kozlov I.E., Petrenko L.A., Glock N.I., & Wekerle C. (2020). Eddies in the North Greenland Sea and Fram Strait from satellite altimetry, SAR and high-resolution model data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2019JC015832. <https://doi.org/10.1029/2019JC015832>
- 2) Kozlov I.E., Petrenko L.A., Plotnikov E.V. (2019). Statistical and dynamical properties of ocean eddies in Fram Strait from spaceborne SAR observations, *Proc. SPIE 11150, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019*, 111500S; doi: 10.1117/12.2533317
- 3) Petrenko L.A., Kozlov I.E. (2020). Properties of eddies near Svalbard and in Fram Strait from spaceborne SAR observations in summer. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. V. 17. № 7. p. 167–177. doi:10.21046/2070-7401-2020-17-7-167-177

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕЧЕНИЙ НАД ГДАНЬСКО-ГОТЛАНДСКИМ ПОРОГОМ ПО ДАНЫМ ГИРЛЯНДЫ ИНКЛИНОМЕТРОВ

Кондрашов А.А., Корж А.О.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Юго-Восточная Балтика, затоковые течения североморских вод, инклинометрические измерения, придонные течения.

В докладе представлены описание эксперимента и результаты измерения векторов течений с использованием гирлянды инклинометрических измерителей (инклинометров) [1] в 49-ой экспедиции НИС «Академик Борис Петров». Измерения производились в июне 2022 года над Гданьско-Готландским порогом на трассе затоковых течений североморских вод.

Известно, что Балтийское море стратифицировано по глубине [2]. Верхний слой распресненных вод отделён от глубинных перманентным скачком солёности и приуроченному к нему скачку плотности – пикноклином, что препятствует перемешиванию этих слоев. Плотностная стратификация препятствует поступлению свежей обогащённой кислородом воды в более плотные придонные воды. Такая ситуация приводит к гипоксии и зачастую к аноксии придонных вод ниже пикноклина, что пагубно сказывается на продуктивности организмов и приводит к сероводородному заражению. Основной механизм вентиляции глубоководных вод для Балтийского моря происходит с эпизодическими затоками плотных соленых североморских вод, насыщенных растворённым кислородом [3]. Изучение придонных течений на трассах таких поступлений является актуальной задачей для мониторинга и прогнозирования экологического обстановки.

Несмотря на то, что основной интерес для изучения представлен измерением именно придонных течений, проведенный натурный эксперимент включает в себя расширение возможностей применения инклинометров и совершенствование методов измерений с их помощью. Для этого отработывалась перспективная методика измерения векторов течений при использовании измерителей не только в традиционном придонном применении, но и с размещением их на буйрепе.

Донная станция представляла собой вертикальную линию – буйреп с подповерхностной плавучестью и якорем на дне. На буйрепе на специальных рамах с заданным шагом дополнительно размещались инклинометры, что позволило получить данные о векторах течений на нескольких горизонтах в толще воды. Придонный измеритель был расположен на отдельном якорю на отводном фале. Подъём станции на судно производился при помощи сигнального буя на поверхности. Глубина места постановки составила 83 метра. Помимо придонного, на буйрепе были размещены еще четыре инклинометра, глубина установки которых составила 13, 33, 53, 73 м. Прибор, установленный на горизонте 53 м., вышел из строя, извлечь информацию из него не удалось. Для остальных приборов получены непрерывные записи данных векторов течений для соответствующих горизонтов с 3 по 23 июня 2022 г.

Анализ информации, полученной в ходе эксперимента позволил отследить развитие и количественно оценить поступление вод из Гданьского залива в южную часть Готландской впадины. Скорость течения, начиная с 9 июня, достигала 30 см/с в придонном слое и до 45 см/с на расстоянии 10 метров от дна. Произведено сравнение полученных данных с реконструкцией поля течений согласно компьютерной модели Corpnicus-NEMO [4], что может являться верификацией достоверности полученных данных. Инклинометры, размещённые на горизонтах 13 и 33 м., с 6 по 12 июня показали весьма сильные и регулярные инерционные волны с периодом, характерным для Балтики.

Несмотря на то, что особенности циркуляции вод достаточно хорошо изучены, проведение продолжительных инструментальных измерений новыми методами позволяет лучше понять роль

различных режимов течений в водообмене между бассейнами Балтийского моря. Следует отметить, что длительные постановки традиционных акустических измерителей течений эпизодически и остаются редки ввиду их высокой стоимости, что способствует развитию применения недорогих инклинометров и совершенствованию методов их использования.

Подобные эксперименты с размещением инклинометров на буйрепе проводятся не впервые, однако методика всё еще находится в стадии доработки. В частности, планируется произвести интеркалибровку такой донной станции совместно с акустическим профилографом течений. На поведение станции влияет и гидродинамический напор воды, что приводит к наклону буйрепа и изменению горизонтов размещения инклинометров. В дальнейшем планируется оснащать верхний инклинометр уровнемером с гидростатическим датчиком давления, что позволит определять истинную глубину размещения приборов.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме: № FMWE-2021-0012.

Список литературы

- 1) Пака В.Т., Набатов В.Н., Кондрашов А.А., Корж А.О., Подуфалов А.П., Облеухов С.Д., Голенко М.Н., Щука С.А. Об усовершенствовании инклинометрического измерителя скорости придонных течений // *Океанологические исследования*. 2019. Том 47. № 2. С. 220–229.
- 2) *Гидрометеорология и гидрохимия морей*. Том 3, Балтийское море. Под редакцией Ф.С.Терзиева. Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат, 1994 г., 435 стр.
- 3) Meier M., Feistel R., Piechura J. and others // *Ventilation of the Baltic Sea deep water: A brief review of present knowledge from observations and models*. *Oceanologia*, 48 (S), 2006, pp. 133–164.
- 4) Служба мониторинга морской среды CMEMS. [Электронный ресурс]. URL: <https://marine.copernicus.eu/> (дата обращения 13.01.2023)

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ДЕКАДНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ГРАДИЕНТОВ ТЕРМОХАЛИННЫХ ПОЛЕЙ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

Коник А.А., Атаджанова О.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Ключевые слова: фоновый градиент, спутниковые измерения, реанализ, Баренцево море.

Фронтальные зоны занимают значимое место в спектре физических явлений, которые наблюдаются в Мировом океане. Образуюсь на границе районов взаимодействия вод, которые имеют разное происхождение и значительно различаются по своим геофизическим характеристикам, фронтальные зоны отличаются сложной внутренней структурой и динамикой. Основным критерием определения фронтальной зоны в Мировом океане является величина градиента одного или нескольких гидрофизических параметров, которая, согласно [1], должна в десять раз превосходить его фоновую величину. В Баренцевом море большинство наблюдаемых фронтальных зон имеют малую величину горизонтального градиента, которая в среднем превышает его фоновое распределение в два–три раза [2, 3]. Однако гидрологические особенности (отрицательные температуры вод, ледяной покров) и климатические изменения, наблюдаемые в морях Арктики [4], воздействуют на термохалинные поля, что в итоге сказывается на величине фонового горизонтального градиента. Стоит также отметить, что выбор различных наборов данных реанализа или спутниковых измерений, используемых в расчетах, может оказывать весомое влияние на итоговую оценку градиента. В результате, в настоящее время остается актуальной проблемой получение адекватной величины фонового горизонтального градиента Баренцева моря за несколько десятилетий, решение которой необходимо для качественной оценки изменчивости фронтальных зон в данном регионе. Таким образом, основная цель данной работы заключается в сравнительном анализе рассчитанных горизонтальных градиентов термохалинных полей в Баренцевом море за летний период с 1993–2022 гг. по набору модельных (реанализ, прогноз, ассимиляция) данных и спутниковым измерениям.

В качестве исходных данных за летний период для расчета фоновых горизонтальных декадных градиентов температуры и солености Баренцева моря использовались наборы среднемесячных данных *MERCATOR PSY4QV3R1* и *CMEMS GLORYS12V1* Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (1993–2022 гг.), суточные данные *GHRSSST OSTIA* (2013–2022 гг.). Кроме того, привлекались среднемесячные спутниковые данные температуры *Aqua/MODIS* и *Suomi NPP/VIIRS* (2003–2022 гг.). Расчет горизонтальных градиентов термохалинных характеристик выполнялся согласно методам, представленным в работах [2, 5]. Затем полученные суточные и среднемесячные данные температуры и солености Баренцева моря осреднялись за декады по месяцам.

Результаты исследования показали, что декадная величина градиента температуры на поверхности по данным *MERCATOR PSY4QV3R1* и *CMEMS GLORYS12V1* за весь летний период не изменялась от декады к декаде и составила $0,014^{\circ}\text{C}/\text{км}$, а максимальный соленостный фоновый декадный градиент отмечался в 1 декаду и составил $0,009\text{‰}/\text{км}$. За 2 и 3 декаду в летние месяцы средний градиент температуры по спутниковым данным варьировался от $0,005^{\circ}\text{C}/\text{км}$ (*Aqua/MODIS*) до $0,006^{\circ}\text{C}/\text{км}$ (*Suomi NPP/VIIRS*). Осреднённый поверхностный градиент температуры, полученный за 3 декаду по данным *GHRSSST OSTIA*, составил $0,003^{\circ}\text{C}/\text{км}$.

Пространственный анализ карт декадных градиентов всех используемых в работе данных показал, что в Баренцевом море выделяются отдельные высокоградиентные (от $0,03^{\circ}\text{C}/\text{км}$ и более) участки вблизи арх. Шпицберген, о. Медвежий, восточнее арх. Новая Земля и вдоль Скандинавского п-ва. Такие области, вероятно, относятся к поверхностным проявлениям фронтальных зон разного генезиса в Баренцевом море [2].

Полученные оценки показывают, что тип данных значительно влияет на величину осредненного

по декадам поверхностного градиента. Разница между рассчитанными оценками градиента, полученная по используемым в работе данным, может составлять около $0,01^{\circ}\text{C}/\text{км}$, что сопоставимо с величиной среднего климатического градиента в Баренцевом море [6]. Стоит также отметить, что на значительную разницу величины горизонтального градиента между различными видами данных могли повлиять облачность и ледяной покров, которые в данном исследовании не учитывались.

Работа выполнена в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН FMWE-2021-0014.

Список литературы

- 1) Физическая природа и структура океанических фронтов. / К.Н. Федоров Л.:Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
- 2) Ivshin V.A., Trofimov A.G., Titov O.V. Barents Sea thermal frontal zones in 1960–2017: variability, weakening, shifting // ICES Journal of Marine Science. 2019. V. 76. P. i3–i9.
- 3) Артамонов Ю.В., Скрипалева В.А., Федирко А.В. Сезонная изменчивость температурных фронтов на поверхности Баренцева моря // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 78–89.
- 4) Yamanouchi T., Takata K. Rapid change of the Arctic Climate system and its global influences - Overview of GRENE Arctic Climate change research project (2011–2016) // Polar Science. 2020. Vol. 25. P. 100548.
- 5) Atadzhanova O.A., Zimin A.V., Svergun E.I., Konik A.A. Submesoscale eddy structures and frontal dynamics in the Barents Sea // Physical Oceanography. 2018. Vol. 25. No. 3. P. 220–228.
- 6) Чвилев С.В. Фронтальные зоны Баренцева моря // Метеорология и гидрология. 1991. № 11. С.103-110.

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В КАРСКОМ МОРЕ

Копышов И.О.^{1,2}, Козлов И.Е.², Фрей Д.И.³, Сильвестрова К.П.³, Корженовская А.И.⁴,
Медведев И.П.³, Гайский П.В.², Осадчиев А.А.^{1,3}, Степанова Н.Б.^{1,3}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Морской гидрофизический институт РАН", Севастополь

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

³Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва

⁴Московский государственный университет им. Ломоносова, Москва

Ключевые слова: Короткопериодные внутренние волны, внутренний прилив, поверхностные проявления, спутниковые изображения, пролив Карские Ворота, Карское море.

Внутренние волны играют немаловажную роль в вертикальном переносе тепла. Их наличие в бассейне вод Северно Ледовитого океана подтверждается поверхностными проявлениями (ПП) на спутниковых изображениях. Особую роль в их изучении занимает исследование районов активной регулярной генерации пакетов короткопериодных внутренних волн (КВВ). Их изучение на шельфе арктических морей происходит на протяжении многих лет, однако в проливе Карские Ворота до сих пор не удавалось произвести детальную высокочастотную регистрацию КВВ. В настоящей работе представлены результаты исследования вертикальных, пространственных и кинематических характеристик КВВ в проливе Карские Ворота по данным натурных измерений за 12 августа 2021 г., полученных в ходе 58-ой экспедиции НИС «Академик Иоффе» в Карском море по программе «Плавающий университет ИО РАН», и по данным анализа спутниковых изображений по всему Карскому морю. Измерения включали данные термопрофилемера, термокос, учащённые STD-зондирования, а также спутниковые изображения РСА Sentinel 1A/B. Данные спутниковых измерений и БПЛА-съёмки показали, что в проливе наблюдается система пакетов КВВ, распространяющихся вдоль пролива в южном и юго-западном направлениях. В ходе измерений было зарегистрировано 18 выраженных колебаний термоклина с диапазонами высот от 4 до 30 м и периодами от 2 до 30 минут, подтверждая существование интенсивных внутренних волн в этом районе. Измерения трех разносенных в пространстве приборов позволили определить фазовую скорость и направление распространения наблюдаемых КВВ. Согласно измерениям, внутренние волны были направлены на юго-запад в сторону Баренцева моря и распространялись с фазовой скоростью около 0,4 м/с.

Следующим этапом работы был анализ спутниковых данных за август-сентябрь 2021 года с целью определения основных районов генерации внутренних волн на акватории Карского моря. Всего было проанализировано 350 снимков за август-сентябрь. Выделены основные районы наблюдения поверхностных проявлений пакетов короткопериодных внутренних волн на спутниковых снимках. На основе судовых измерений анализировались вертикальные профили плотности и оценивались теоретические значения фазовых скоростей внутренних волн.

Работа выполнена в рамках программы «Плавающий университет» МФТИ и ИО РАН, государственного задания по теме № FNNN-2021-0010, а также при финансовой поддержке гранта РФФ 21-17-00278.

ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ТОЛЩИНУ КВАЗИОДНОРОДНОГО СЛОЯ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

Коржуев В.А.

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: верхний квазиоднородный слой, ветровое перемешивание, механизмы генерации турбулентности, многомасштабная модель турбулентности, модель Ниилера-Крауса.

Модели динамических процессов верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) океана недостаточно точно параметризуют влияние ленгмюровского и турбулентного перемешивания [1], что создает значительные отклонения при сопоставлении данных моделирования ВКС с натурными данными. В данной работе представляются результаты усовершенствования модели перемешанного слоя Ниилера-Крауса [2] с помощью многомасштабной модели турбулентности [3] с целью улучшения качества моделирования перемешанного слоя для различных режимов перемешивания.

Принимается, что толщина ВКС - это область, ограниченная с двух сторон: сверху - пограничным слоем океан-атмосфера, снизу - верхней границей сезонного термоклина, глубину которой можно вычислить с помощью модели Ниилера-Крауса.

Оценка влияния турбулентной энергии на изменение толщины ВКС осуществляется с помощью многомасштабной модели турбулентности: параметризуются механизмы генерации турбулентной энергии сдвигом скорости течения, нелинейности поверхностного волнения и обрушениями волн. Тепловой баланс и работа на изменение сил плавучести учитываются в соответствии с моделью перемешанного слоя Ниилера-Крауса, оценивается инсоляция, испарение, эффективное излучение поверхности океана и контактный турбулентный обмен с атмосферой.

Сбор натурных данных осуществлялся на стационарной океанографической платформе Черноморского гидрофизического подспутникового полигона Морского гидрофизического института РАН (МГИ) в п.г.т. Кацивели в 2021 году. Наблюдения проводились с помощью специализированной аппаратуры, созданной, главным образом в МГИ.

В ходе работы получены следующие выводы:

- исследована зависимость динамики толщины перемешанного слоя под влиянием поверхностных волн, турбулентного перемешивания, интенсивности теплового обмена и изменения частоты плавучести;
- отмечено, что отсутствие, на данный момент, общепринятого метода расчета вклада поверхностных волн в турбулизацию понижает качество моделирования;
- проведено сравнение модели Ниилера-Крауса с результатами предыдущего исследования [4], показано, что введение дополнительных и уточнение использованных в предыдущей работе параметров улучшает результаты модельных расчетов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-17-00150.

Список литературы

- 1) Belcher S.E., Grant, et al. A global perspective on Langmuir turbulence in the ocean surface boundary layer // Geophys. Res. Let., 2012. – Vol. 39. – L.18605.
- 2) Niiler P.P., Kraus E.B., One-dimensional models of the upper ocean. Modelling and prediction of the upper layers of the ocean // Pergamon Press, 1977. Vol. 1. – 143-172.
- 3) Чухарев А. М., Модель турбулентности со многими временными масштабами для приповерхностного слоя моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 439 С. 477-488.

- 4) Коржуев В.А. Влияние приповерхностной турбулентности на вертикальный обмен в верхнем квазигомогенном слое по измерениям на подспутниковом полигоне ФИЦ МГИ // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2022. С. 178. DOI 10.21046/20DZZconf-2022a.

СГОННО-НАГОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЗОНЕ СМЕШЕНИЯ РЕЧНЫХ И МОРСКИХ ВОД НА ПРИМЕРЕ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Коробченкова К.Д.^{1,2}, Стонт Ж.И.², Ульянова М.О.²

¹Балтийский Федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

²Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: юго-восточная часть Балтийского моря, соленость, температура, сгонно-нагонные явления, ветровое воздействие.

Для системы р. Преголя – Калининградский залив – Балтийское море характерно формирование сгонно-нагонных явлений под воздействием внешних условий (направление и скорость ветра, уровень моря, расход речных вод), в результате чего характеристики вод (соленость, температура и некоторые другие) в районе устья реки, заливе и прибрежной части моря отличаются друг от друга.

На основе натурных данных и измерений ветра была рассмотрена структура вод, выносимых из Калининградского залива, и морских вод, поступающих через Балтийский пролив при затоке, а также условия, при которых происходят сгонно-нагонные явления.

Начиная с 2020 г. Атлантическим отделением Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН проводятся измерения в системе р. Преголя–Калининградский залив–Балтийское море для наблюдения за геоэкологическим состоянием прибрежной зоны юго-восточной части Балтийского моря, испытывающей высокую антропогенную нагрузку. Выполнено восемь судовых съемок весной, летом и осенью 2020-2022 гг. Выполнялось STD-зондирование водной толщи от поверхности до дна в режиме свободного падения. Также анализировались метеорологические данные (скорость и направление ветра) из архива погоды на метеостанции в г. Балтийск (<https://rp5.ru/>).

В дни съемок, когда преобладали ветры северо-западного направления (15 мая и 19 октября 2021 г., 25 мая и 13 октября 2022 г.), наблюдался заток морских вод в залив. Ветры восточного направления, напротив, способствовали выносу вод залива в Балтийское море (6 августа 2020 г., 15 мая 2021 г., 2 марта 2022 г.). Это подтверждается результатами зондирования (данные о температуре и солености).

Появление южной и особенно западной составляющей в направлении ветра приводит к тому, что уже сформированный вынос из залива ослабевает, и заливные воды начинают распространяться вдоль Самбийского полуострова на север [1].

В некоторые экспедиционные выходы (15 мая 2021 г., 2 марта 2022 г.) частая смена направления ветра (в пределах трёх суток вместе с днём экспедиции) благоприятствовала одновременно поверхностному выносу речных и заливных вод и затоку морских вод по дну в залив.

Наибольшая активность ветра наблюдалась в осенний период (октябрь 2021 и 2022 гг.), которая связана с перестройкой атмосферных процессов и усилением западного переноса. Порывы ветра западных румбов достигали скорости 10-11 м/с. Для осенних съемок 2020-2022 гг. характерна смена ветра западного направления на южное. Водная толща в районе Калининградского морского канала (КМК) от устья р. Преголя до выхода из Балтийского пролива однородна по температуре и солености, затем можно выделить ярко выраженную фронтальную зону в районе выхода из Балтийского пролива и верхний квазиоднородный слой воды до верхней границы сезонного термоклина (до 38-40 м).

Для весенних и летних съемок 2020-2022 гг. характерна смена ветра западного направления на южное и восточное. Водная толща стратифицирована по температуре и солености, выражен поверхностный слой воды (от устья до 5–10 км КМК мощностью примерно 5 м), в котором отмечаются линзы воды с максимальными значениями температуры и минимальными солености.

Таким образом, можно выделить следующие ситуации, характерные для исследуемой акватории: заток морских вод в залив и КМК при северо-западных ветрах; вынос вод залива в море при ветрах восточных румбов; одновременный поверхностный вынос речных и заливных вод и заток морских вод по дну в залив при переменных ветрах. Образование ярко выраженной фронтальной зоны у Балтийского пролива происходит при смене западного ветра на южный и восточный.

Исследование в 2020-2021 гг. выполнено по теме госзадания № FMWE-2021-0012, в 2022 г. поддержано из средств программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» БФУ им. И. Канта, научный проект № 122110200031-7.

Список литературы

- 1) Лаврова О. Ю., Краюшкин Е. В., Соловьев Д. М., Голенко М. Н., Голенко Н. Н., Калашникова Н. А., Демидов А. Н. Влияние ветрового воздействия и гидродинамических процессов на распространение вод калининградского залива в акватории Балтийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 76–99

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В БЕЛОМ МОРЕ ПО НАТУРНЫМ ДАННЫМ ЗА ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2019-2022 ГГ

Котельников В.Д., Татаренко Ю.А., Подрезова Н.А.

Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Белое море, гидрология, вековые разрезы, экспедиционные данные, водные массы.

В 2019-2022 годах в летний период на научно-исследовательских судах «Иван Петров» и «Профессор Молчанов» проводились экспедиции в Белом море. Целью экспедиций было получение комплексной информации о состоянии природной среды Белого моря. Одной из задач экспедиций являлось выполнение исследования гидрологических характеристик на вековых и стандартных океанографических разрезах. В данной работе авторы рассматривают 3 вековых разреза, выполненных в июне: первый - от мыса Святой нос до мыса Канин нос, второй - от устья реки Пулоньга до деревни Инцы и третий - от острова Зелёные Луды до маяка Зимнегорский. Исследования термохалинной структуры воды проводились посредством выполнения STD-зондирований с помощью комплекса для отбора проб воды SBE 32 с установленным STD-зондом, SBE 19 plusV2, производства компании SeaBird Electronics Inc (США).

На разрезе от острова Зелёные Луды до маяка Зимнегорский ближе к берегам наблюдается распреснение воды, вызванное стоком рек, и повышение температуры. В 2019 году на восточной границе разреза температура на поверхности достигает 10°C , а солёность - 23‰ , небольшое распреснение воды вызвано влиянием Северной Двины. На восточной границе разреза температура также достигает 10°C , но солёность наблюдается около 26‰ , в то время как в других районах на поверхности всего около 7.5°C и 26‰ , соответственно. Термоклин и галоклин наблюдаются на глубине 20-30м. Нулевая изотерма наблюдается на глубине 40-60м, затем температура плавно понижается до -1°C у дна. Солёность повышается с глубиной и в центральной части разреза у дна достигает примерно 29.5‰ . В 2020 году ядра тёплых распреснённых водных масс выражены менее чётко, в них температура достигает 12.5°C и солёность до 23‰ . Температура на поверхности в других районах около 10°C и солёность - 24.5‰ . Термоклин и галоклин расположены на глубине 25-35м. Нулевая изотерма проходит на глубине 40-55м. Придонная водная масса по характеристикам не отличается по значениям в 2019 году. В 2021 году выражена только водная масса, находящаяся у маяка Зимнегорский. Её температура достигает 15°C , солёность - 21‰ . На остальной части разреза поверхностный слой прогрет до 11°C , солёность около 25‰ . Галоклин не выражен. Термоклин на глубине 15-25м. Нулевая изотерма на глубине от 50м в западной части акватории, и до 100м в восточной. Характеристики ниже 100м не отличаются от предыдущих исследуемых годов. В 2022 году ситуация похожа на 2021 год. Температура на поверхности около 10°C , в ядре 15°C . солёность на поверхности примерно 25‰ , в ядре - 21‰ . Термоклин примерно на глубине 25м, нулевая изотерма на глубине 40-80м. На максимальной глубине температура -1°C , солёность 29‰ .

На разрезе от устья реки Пулоньга до деревни Инцы в 2019 году температура одинаковая на всей акватории - примерно 7.5°C . Солёность около 27.5‰ у устья реки и около 26.5‰ у восточного берега. В 2020 году у деревни Инцы наблюдается распреснённая тёплая водная масса с температурой около 6°C и солёностью 25‰ . В центральной части находится минимум температуры - 4.5°C . У устья реки Пулоньга температура около 5°C . У западного берега максимальная солёность на разрезе - 27.5‰ . Солёность повышается от правой границы разреза к левой. В 2021 году тёплая и пресная водная масса расположена на поверхности у восточного берега, её температура около 10°C , солёность около 22‰ . Минимальная температура, как и в 2020 году, наблюдается в

центральной части разреза и достигает 4°C. В других районах температура около 5.5°C. Максимальная солёность наблюдается в левой части разреза и составляет 29‰, затем плавно убывает до минимума в правой части - 27‰. В 2022 году, как и в 2019 году, отсутствует выраженное ядро тёплой и распреснённой водной массы. Максимум температуры наблюдается на поверхности - около 6°C, на глубине - около 3°C. Минимум солёности на поверхности - примерно 22‰, максимум - у дна около 28‰.

На разрезе от мыса Святой нос до мыса Канин нос в 2019 году выявлена тёплая и распреснённая водная масса, находящаяся в центральной части разреза. Её температура около 10°C, солёность 29‰. В других частях разреза температура на поверхности около 7.5°C, с глубиной уменьшается до 3.5°C. Максимальная солёность наблюдается у дна в западной части разреза - 34‰, у поверхности до 33‰. В восточной части разреза у дна около 33.5‰, а у поверхности наблюдается понижение до 31‰. В 2020 году поверхностный слой в восточной части более распреснён и прогрет, чем в западной. У мыса Канин нос температура изменяется от 6.5°C на поверхности, до 2°C у дна, солёность от 30‰ на поверхности, до 34‰ у дна. У мыса Святой нос температура у поверхности равна 6°C и солёность - 33.5‰, у дна около 5°C и 34‰. В центральной части разреза у поверхности наблюдаются следующие характеристики воды - около 6°C и 31‰, температура уменьшается до дна и составляет 3.5°C, а солёность начиная с 20 метров становится примерно равной 34‰. В 2021 году ситуация аналогичная 2020 году. У мыса Канин нос температура изменяется от 6.5°C на поверхности, до 1°C у дна, солёность - от 30‰ на поверхности, до 34‰ у дна. У мыса Святой нос характеристики воды - 6°C и 33.5‰ у поверхности и около 4°C и 34‰ у дна. В центральной части разреза у поверхности наблюдается температура около 5.5°C и солёность - 31‰, температура уменьшается ко дну до 3°C, а солёность начиная с 20 метров и ниже становится примерно равной 34‰. В 2022 году в западной части разреза относительно однородное распределение температуры до 4°C и солёности - 34‰ на поверхности и до 3°C и 34.5‰ у дна соответственно. В восточной части на поверхности температура равна 6°C и солёность - до 30‰, у дна - до 1°C и 34‰, соответственно.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА НАД АКВАТОРИЯМИ БЕЛОГО, БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ЭКСПЕДИЦИИ «АРКТИЧЕСКИЙ ПЛАВУЧИЙ УНИВЕРСИТЕТ – 2022»

Кочурова А.А.¹, Зотова Е.В.², Червяков М.Ю.³

¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, г. Архангельск

²Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

³Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, г. Саратов

Ключевые слова: облачность, Арктика, Арктический плавучий университет.

В настоящей работе проанализированы данные визуальных наблюдений за облачностью, полученные в рамках рейса «Арктический плавучий университет – 2022: меняющаяся Арктика». Экспедиция проходила на научно-исследовательском судне «Профессор Молчанов» в акватории Белого, Баренцева и Карского морей в период с 24 июня по 15 июля 2022 года. На протяжении экспедиции в журнале метеорологических наблюдений ежедневно фиксировались координаты судна, дата и время проведения наблюдений, общее количество облаков, количество облаков нижнего яруса (в баллах), формы облаков, наличие и характер осадков и явления погоды. Формы облаков определялись согласно «Атласу облаков» и методике, изложенной в «Наставлении гидрометеорологическим станциям и постам» [1, 2].

Для оценки повторяемости количества общей и нижней облачности полученные в ходе экспедиции данные были разбиты на пять градаций: 0–2 балла (ясное небо), 3–4 балла, 5–6 баллов, 7–8 баллов, 9–10 баллов (пасмурное небо). Поскольку во время рейса были часты случаи туманов, при которых неба не было видно, добавлена градация «туманы».

Распределение повторяемости количества общей и нижней облачности на протяжении экспедиции выражалось в значительном преобладании числа случаев пасмурного неба над всеми остальными: 53 % для общей облачности и 48 % для нижней. Также довольно велика повторяемость туманов (29 % от общего числа наблюдений). Доли случаев остальных градаций малы и составляют менее 7 % для общей облачности и менее 12 % для нижней.

В течение экспедиции преобладающим типом облачности являлись слоистообразные формы (*Stratus*, *Nimbostratus* и туманы). Повторяемость слоистых (*Stratus*) и слоисто-дождевых (*Nimbostratus*) облаков, рассчитанная для случаев, когда количество нижней облачности превышало 5 баллов, составила 53 %.

Для периода, в течение которого велись визуальные наблюдения за облачностью, был подготовлен архив синоптических карт для дальнейшей оценки фактической погоды. Для анализа были использованы карты Гидрометцентра России, выпускаемые для сроков 00, 06, 12 и 18 UTC [3]. Отметим, что данные визуальных наблюдений за облачностью и карт погоды в целом хорошо согласуются между собой.

По данным синоптических карт Гидрометцентра, с 25 июня 2022 г. над Баренцевым и Белым морями образовалась область повышенного давления, на смену которой 3 июля пришла серия из трех последовательных циклонов с Атлантики. С 10 июля акватория вновь была занята антициклоном, который 12 июля был смещен циклоном в Карское море. 14 июля в акваторию Баренцева моря пришел новый циклон.

Анализ синоптических карт и данных наблюдений за облачностью позволил выявить некоторые закономерности. Так, слоистые облака в различном количестве (чаще сплошной покров) и туманы часто наблюдались в областях повышенного давления, в переходных зонах с небольшим барическим градиентом между циклоном и антициклоном, между двумя циклонами, в седловинах. Перед теплым фронтом в передней части циклона в южной части Баренцева моря (00 UTC

12 июля) отмечались слоистые, высокослоистые, перисто-кучевые, перистые облака; в теплом секторе циклона после прохождения фронта – слоистые, перистые, перисто-кучевые облака, туман. Ночью 14 июля в Белом море перед фронтом окклюзии наблюдались высококучевые, высокослоистые, перистые облака, а во время его прохождения шли осадки из слоисто-дождевых облаков.

Таким образом, в ходе исследования с учетом синоптической ситуации были проанализированы данные наблюдений за облачностью, полученные в экспедиции «Арктический плавучий университет – 2022» над акваториями Белого, Баренцева и Карского морей. Выявленные зависимости могут быть использованы при анализе синоптических карт, более точной интерпретации спутниковых снимков облачности, в особенности, в инфракрасном спектре, а также более детального нефанализа.

Коллектив авторов выражает благодарность проекту «Арктический плавучий университет» за возможность проведения исследований на борту НИС «Профессор Молчанов», а также студентам гидрометеорологической группы, осуществлявшим визуальные наблюдения за облачностью: Дудоркину Егору (СПбГУ), Калининну Михаилу (МГУ), Котельникову Владимиру (РГГМУ) и Онищенко Надежде (МГУ).

Исследования проведены в рамках морской научно-образовательной экспедиции «Арктический плавучий университет – 2022: меняющаяся Арктика» Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, поддержанной грантом Всероссийской общественной организации «Русское географическое общество» (Договор №28/2022-И/ДД-303.2022).

Список литературы

- 1) Атлас облаков / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Гл. геофиз. обсерватория им. А.И. Воейкова; [Д. П. Беспалов и др.; ред.: Л. К. Сурыгина]. СПб: Д'АРТ, 2011. 248 с.
- 2) Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Часть 1. Метеорологические наблюдения на станциях. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 300 с.
- 3) Гидрометцентр России. URL: <https://meteoinfo.ru/> (дата обращения: 18.12.2022).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ КРИТЕРИЕВ ВЫДЕЛЕНИЯ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР В ДАННЫХ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Кошкина В.С.^{1,2}, Гавриков А.В.²

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Москва

²Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: когерентные структуры, мезомасштабная метеорология, идентификация вихрей, численное моделирование.

В геофизике когерентные структуры (КС), то есть структуры, сохраняющие свои свойства в пространстве и развивающиеся во времени, в подавляющем большинстве случаев соответствуют вихревым образованиям. Вихри, в свою очередь, встречаются в природе повсеместно. На мелких масштабах вихревая динамика определяет механизмы турбулентного взаимодействия (перемешивание, тепло-массообмен). На синоптическом и мезомасштабах вихри играют важную роль в процессах переноса импульса, температуры и массы как в океане, так и в атмосфере. Таким образом, вихри имеют большое значение для понимания динамики океана и атмосферы на всех масштабах, а точность описания этой динамики зависит главным образом от объективности идентификации вихря. Настоящая работа посвящена методам выделения КС в результатах численного моделирования.

Трудность в объективной идентификации КС заключается в отсутствии общепринятого математического определения вихря и, в особенности, его внешней границы. Таким образом, существует необходимость в инвариантных и объективных критериях, максимально достоверно описывающих границу вихря. Существует два основных подхода к выделению когерентных структур: эйлеров и лагранжев. Эйлеров подход основан на топологическом анализе полей динамических переменных, в то время как в подходе Лагранжа анализируются траектории отдельных взятых жидких частиц с помощью методов из теории динамических систем.

В настоящей работе мы рассматриваем критерии эйлерова подхода, поскольку методы этого класса широко распространены и менее вычислительно затратны. Актуальность проблемы подчеркивает тот факт, что за последние 30 лет было разработано множество критериев эйлерового класса, наиболее популярные из которых базируются на анализе тензора градиента скорости. В этом исследовании мы будем говорить о применимости Q [1], Δ [2] и λ_2 [3] -критериев для идентификации вихрей в данных численного моделирования различного разрешения. Для упрощения использованы данные об атмосфере - региональный высокоразрешающий исторический атмосферный прогноз над Северной Атлантикой NAAD (North Atlantic Atmospheric Downscaling) [4], созданный в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

В ходе исследования выявлена следующая особенность эйлеровых критериев: строгое условие вихря в соответствии с математической постановкой ($Q, \Delta, \lambda_2 > 0$) выделяет обширные области сливающихся друг с другом КС. Таким образом, для различения форм и размеров вихрей индивидуально необходимо увеличивать пороговое значение критерия до тех пор, пока КС не начнут выделяться отчетливо. В силу невозможности описания одним пороговым значением критерия всей трехмерной структуры, необходимо рассмотрение порогового значения как функции высоты. Для определения соответствующей функциональной зависимости были посчитаны количества выделяемых КС на каждом уровне высоты и проведена аппроксимация полиномом 4-го порядка по величинам максимумов количеств КС. В нашем исследовании для выделения отдельных вихревых структур на каждом из вертикальных уровней была проведена кластеризация когерентных структур. Для этого применялся метод машинного обучения DBSCAN (Density-based spatial clustering

of applications with noise, плотностной алгоритм пространственной кластеризации с присутствием шума) [5]. При кластеризации в качестве признакового описания использовались горизонтальные координаты точек, удовлетворяющих пороговому значению критерия. После кластеризации был произведен расчет геометрических характеристик отдельных вихревых структур: определены центры, рассчитаны площади, а также радиусы в предположении формы окружности. На основе этих данных была получена базовая статистика КС в различные сезоны 2010 года. Согласно расчетам, наблюдается большое количество вихрей в нижнем слое, а затем уменьшение их количества с увеличением высоты. Такое уменьшение может быть обусловлено трением о поверхность Земли. Размеры КС постепенно растут с высотой, что объясняется уменьшением влияния силы трения.

В работе показано, что все 3 рассмотренных критерия согласуются в воспроизведении размеров и количества КС, однако при рассмотрении интегральных характеристик наиболее перспективными выглядят Q - и λ_2 -критерии. Поскольку λ_2 -критерий выведен из динамических соображений, а также позволяет отличать баротропную структуру от бароклининой, он является более предпочтительным. Таким образом, в ходе исследования был произведен расчет критериев в данных численного моделирования атмосферы над Северной Атлантикой, разработан алгоритм вычисления статистик КС и получена полиномиальная зависимость порогового значения критерия от высоты. Поскольку для большей части динамики как атмосферы, так и океана, предположение несжимаемости и стационарности потока не является справедливым, эйлеров подход может давать недостаточно точные результаты. Как следствие, следующим шагом работы будет применение лагранжевого подхода к выделению когерентных структур. Кроме того, в дальнейшем планируется разработать алгоритм отслеживания траекторий КС.

Работа выполнена в рамках госзадания № FMWE-2022-0002.

Список литературы

- 1) J. C. R. Hunt, a. a. Wray, and P. Moin. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows. Center for Turbulence Research, Proceedings of the Summer Program, (1970):193–208, 1988.
- 2) M. S. Chong, A. E. Perry, and B. J. Cantwell. A general classification of three-dimensional flow fields. *Physics of Fluids A*, 1990. ISSN 08998213. doi: 10.1063/1.857730
- 3) J. Jeong and F. Hussain. On the identification of a vortex. *Journal of Fluid Mechanics*, 285:69–94, 1995. ISSN 14697645. doi: 10.1017/S0022112095000462.
- 4) A. Gavrikov, S. K. Gulev, M. Markina, N. Tilinina, P. Verezemskaya, B. Barnier, A. Dufour, O. Zolina, Y. Zyulyaeva, M. Krinitskiy, I. Okhlopov, and A. Sokov. RAS-NAAD: 40-yr High-Resolution North Atlantic Atmospheric Hindcast for Multipurpose Applications (New Dataset for the Regional Mesoscale Studies in the Atmosphere and the Ocean). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(5):793–817, 2020. ISSN 1558-8424. doi: 10.1175/jamc-d-19-0190.1
- 5) E. Schubert, J. Sander, M. Ester, H. P. Kriegel, and X. Xu. DBSCAN revisited, revisited: Why and how you should (still) use DBSCAN. *ACM Transactions on Database Systems*, 42(3), 7 2017. ISSN 15574644. doi: 10.1145/3068335

ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ В МНОГОСЛОЙНОЙ СРЕДЕ АТМОСФЕРА-СНЕГ-ЛЁД-ВОДА НА ПРИМЕРЕ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

Кравцова К.В., Подрезова Н.А.

Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Финский залив, ледовый покров, снежный покров, многослойная среда, тепловые потоки.

Лёд в Финском заливе образуется ежегодно, но сроки его появления и исчезновения, а так-же степень распространения зависят от суровости зимы. Процесс льдообразования происходит в направлении с востока на запад. Первый лёд, как правило, появляется в заливах и бухтах, глубоко вдающихся в берег. В Финском заливе ледовый период начинается в середине ноября. Максимальное развитие ледяного покрова отмечается в конце февраля - марте. Средняя толщина льда в описываемом районе невелика (0,1 - 0,3 м), но в суровые и очень суровые зимы она может увеличиваться до 0,8 м, а иногда до 1 м. Разрушение ледяного покрова в восточной части моря происходит в направлении с запада на восток. В Финском заливе разрушение припая начинается в третьей декаде марта - начале апреля. Межгодовая изменчивость сроков взлома ледяного покрова в Финском заливе достигает 60 - 70 суток. В суровые зимы Финский залив окончательно очищается ото льда во второй половине мая, в умеренные - в начале мая, а в мягкие - в первой или второй декаде апреля [1].

В период с 8.02.2021 по 20.02.2021 в восточной части Финского залива около города Ораниенбаум проводилась учебная Ледовая практика для студентов океанологов 2 курса Российского Гидрометеорологического Университета. Для получения информации о вертикальном распределении температуры в многослойной среде атмосфера-снег-лед-вода была встроена термокоса, которая содержала 4 датчика. Причем, датчики были установлены таким образом, что бы 1 датчик находился в снегу, 2 и 3 датчики вмораживались в лёд и 4 датчик находился в подледной воде. Значения температуры измерялись 18 и 19 февраля, таким образом, было проведено 2 эксперимента [2].

Эксперимент 1. 18 февраля средняя температура атмосферы, во время проведения эксперимента, составляла - 18°C. Облачность – 0 баллов. Ветер – штиль. Местность закрытая – Сидоровский канал. Время эксперимента составило 3 часа 10 минут. Можно отметить, что наибольшие изменения температуры фиксируются на 1 датчике, который находится в снегу. Где можно отметить возрастание температуры с -4 °С до -1 °С в течение часа. 2 и 3 датчики фиксируют небольшие колебания температуры от 0 °С до 1°C на протяжении всего эксперимента.

Эксперимент 2. 19 февраля средняя температура атмосферы, во время проведения эксперимента, составляла - 10°C. Облачность – 8-9 баллов. Ветер – 2 м/с. Местность – открытая, на заливе. Время эксперимента составило – 3 часа. Можно отметить, что на протяжении всего эксперимента, наибольшие изменения температуры наблюдаются на 1 датчике, в снегу, которые составляют от -6 °С до -3 °С. На 2 и 3 датчиках температура стабилизировалась в течении нескольких минут и фиксирует температуру равную -0,5 °С. Можно заметить, что на графике есть небольшой интервал с температурами выше представленных значений, как некая аномалия.

Можно отметить, что полученные профили температуры в двух экспериментах существенно отличаются только на 1 датчике, который фиксирует температуру в снегу. Что можно объяснить различными условиями эксперимента, а именно тем, что термокоса вмораживалась в разных местах залива (в закрытой и открытой частях), подверженностью различным значениям температуры атмосферы, а так же различной скорости ветра.

Тепловой поток через снежный покров при квазистационарном режиме прямо пропорционален температурному градиенту и обратно пропорционален термическому сопротивлению снежного

покрова. Поэтому вклад температуры воздуха и термического сопротивления снежного покрова, в значительной степени зависящего от коэффициента теплопроводности снега.

Известные зависимости коэффициента теплопроводности снега показывают большой разброс значений при одинаковой плотности снега. Одна из причин этого – структурные особенности снежного покрова. Так, коэффициент теплопроводности глубинной изморози в несколько раз меньше, чем зернистого снега при равной плотности. Поэтому слоистость снежного покрова, обусловленная как метеорологическими условиями, так и процессами метаморфизма, влияет на его термическое сопротивление и температурный режим подстилающих оснований [3].

Для расчета тепловых потоков в каждой из исследуемых сред, использовалась формула [4]: $\Phi = ((T_2 - T_1)/h)kC\rho$, [Вт/м²]; где h – расстояние между датчиками [м], k – коэффициент турбулентного обмена [м²/с], C – теплоёмкость среды [Дж/кг °С], ρ – плотность сред [кг/м³].

Рассчитанные значения тепловых потоков составили $\Phi_{\text{вода}} = 540.94$ Вт/м², $\Phi_{\text{лед (нижняя граница)}} = 783.11$ Вт/м², $\Phi_{\text{лед (верхняя граница)}} = 40945.62$ Вт/м², $\Phi_{\text{снег}} = 19383.71$ Вт/м². Из расчётов видно, что тепловой поток постепенно увеличивается, от воды к атмосфере. В природных условиях поток тепла от воды ко льду обычно имеет место быть. Он уменьшает значение суммоградусов дней мороза тем существеннее, чем больше толщина льда. Также под воздействием этого потока тепла может наступить таяние льда с его нижней поверхности несмотря на отрицательную температуру воздуха. Как известно, толщина заснеженного льда оказывается меньше, чем льда без снежного покрова. Это уменьшение зависит от толщины слоя снега и теплопроводности. Это вытекает из того, что снег является хорошим теплоизоляционным материалом, то есть температура льда под снегом выше, чем бесснежного.

В результате проведенного исследования, получили измерения термометрической косой, показали вертикальные профили температуры, которые позволили рассчитать тепловые потоки в многослойной среде.

Список литературы

- 1) Захаров В. Ф. Морские льды в климатической системе // Проблемы Арктики и Антарктики. Выпуск 69. СПб: Гидрометеоздат, 1995. с. 15-26
- 2) Podrezova N.A., Kravtsova K.V. Ice research in the gulf of FINLAND // В сборнике: Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Proceedings of 7th International Conference. Сер. "Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences" 2022. С. 271-279
- 3) Котляков В.М., Сосновский А.В., Осокин Н.И. Оценка коэффициента теплопроводности снега по его плотности и твёрдости на Западном Шпицбергене // Институт географии РАН, Москва, Россия, 2018 г.
- 4) Доронин Ю.П. Физика океана // Учебное пособие - СПб.: изд. РГГМУ, 2002.-340с.

ОСОБЕННОСТИ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА И ШТОРМОВОЙ АКТИВНОСТИ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ

Круглова Е.Е.^{1,2}, Мысленков С.А.^{1,2,3}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Институт Океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

³Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва

Ключевые слова: ветровое волнение, штормовая активность, моделирование ветровых волн, ветровой режим, Каспийское море, WAVEWATCHIII.

По данным на сентябрь 2022 года перевалка сухих грузов в Каспийском бассейне выросла на 12,3% и составила 2,1 млн тонн [1]. Помимо этого, в Каспийском море планируется начать добычу на газовом месторождении им. Кувыкина [2]. Таким образом изучение режимных и экстремальных характеристик ветрового волнения является важной и актуальной задачей. Данная работа посвящена анализу особенностей ветрового режима и штормовой активности в Каспийском море.

Для анализа ветрового волнения применялась волновая модель WAVEWATCHIII. В качестве входных данных о ветре использовались данные реанализа высокого разрешения NCEP/CFRS/CFRSv2 за период с 1979 года по 2020 год. Пространственное разрешение реанализа составляет $\sim 0.2-0.3^\circ$, шаг по времени 1 час. Поля льда были взяты из базы OSI-450 и реанализа NCEP/CFRSv2. Вычисления проводились на неструктурной триангуляционной сетке с шагом от 10 до 1-2 км. Общее количество узлов 17529[3,4].

Для анализа штормовой активности (далее - штормов) и повторяемости ветровых ситуаций использована методика Peak Over Threshold (POT)[5,6]. В результате расчета по модели WAVEWATCH III был получен ряд данных о параметрах волнения за период с 01.01.1979 г. по 31.12.2020 г., шаг по времени 3 часа. В данной работе анализировалась значительная высота и направление распространения волн, а также скорость и направление ветра.

При оценке трендов штормовой активности Каспийское море разделялось на три района: Северный, Средний и Южный Каспий. Для оценки трендов на значимость использовался критерий Фишера. В Северном Каспии трендов нет. Значимые положительные тренды наблюдаются для Среднего Каспия для штормов с высотой значительных волн $>2\text{м}$, $>3\text{м}$ и $>4\text{м}$. Максимальная величина тренда для штормов с высотами $>2\text{м}$ (10 штормов/10 лет). Для Южного Каспия значимых трендов не найдено, но полученные линейные тренды были отрицательными. Для анализа причин разнонаправленности трендов в разных частях Каспийского моря были выбраны две точки в Среднем и Южном Каспии. Проведлся расчет повторяемости штормов для этих точек.

Розы ветров показывают, что для Среднего Каспия характерны два противоположных направления — ветра северо-западных и юго-восточных румбов. Аналогичное распределение наблюдается и на среднегодовых розах штормов. Выполнен анализ повторяемости ветровых событий с разными скоростями ветра. Для точки в Среднем Каспии средняя за весь период продолжительность отдельных событий ветра со скоростью $>5\text{м/с}$ составляет 50 часов, а для скоростей $>12\text{ м/с}$ — 15. Анализ взаимосвязи количества штормов в Среднем Каспии и разных скоростей ветра действующих несколько часов подряд (6, 9, 15, 24 и 30) показал корреляцию 0,76 между штормами высотой $>2\text{м}$ и скоростью 12 м/с действующих >9 часов подряд, и ветром со скоростью 14 м/с наблюдающимся >6 часов подряд (0,73). Для ветра $>12\text{м/с}$ и продолжительностью >6 часов подряд связь со штормами в точке в Среднем Каспии выше (0,84), а для ветра со скоростью $>14\text{ м/с}$ ниже (0,61). На основе полученных связей штормового волнения и повторяемости ветровых событий были проанализированы тренды ветровых событий. Найдены положительные значимые тренды для количества ветровых ситуаций со скоростью $>14\text{ м/с}$ и продолжительностью >6 и >9 часов.

Для ветровых ситуаций >12 м/с с продолжительностью >6 и >9 часов тренды положительные незначимые.

При анализе роз штормов видно, что для точки в Южном Каспии большая часть штормов приходит с северных направлений, это прослеживается и на розах ветров. Для точки в Южном Каспии средняя продолжительность отдельных ветровых событий со скоростью >5 м/с ~ 8 часов и ~ 7 часов для скоростей >12 м/с. В этой же точке наибольшая корреляция получена для штормов высотой >3 м и ветром со скоростью 12 м/с и длительностью >6 часов подряд (0,77). Также наблюдается высокая корреляция между штормами высотой >2 м и ветром со скоростью 10 м/с, действующим >6 часов подряд (0,74). Максимальная корреляция для количества штормов высотой >2 м во всем Южном Каспии и ветром 12 м/с действующим >6 часов подряд – 0,56. Значимого тренда для данных ветровых событий нет. Также ветровые события были поделены на сектора по направлениям: северный $315^\circ-45^\circ$, восточный $45^\circ-135^\circ$, южный $135^\circ-225^\circ$ и западный $225^\circ-315^\circ$. Максимальная корреляция – 0,67 для штормов с высотами волн >2 м и количеством ветровых событий 10 м/с дующих с севера. Тренд для данных ветровых событий не найден.

Работа Мысленкова С.А. выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Работа Кругловой Е.Е. подготовлена в рамках выполнения темы № FMWE-2021-0002 государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

Список литературы

- 1) Грузооборот морских портов России за 8 месяцев 2022 г. [Электронный ресурс] Главная: Новости: Грузооборот морских портов России за 8 месяцев 2022 г. // URL: <https://www.morport.com/rus/news/gruzooborot-morskih-portov-rossii-za-8-mesyacev-2022> (дата обращения 16.12.2022)
- 2) ЛУКОЙЛ планирует начать добычу на месторождении Кувькина [Электронный ресурс] Главная: Новости: Добыча: ЛУКОЙЛ планирует начать добычу на месторождении Кувькина URL: <https://neftegaz.ru/news/dobycha/742458-lukoil-planiruet-nachat-dobychu-na-mestorozhdenii-kuvykina-na-god-pozzhe-v-2027-godu/> (дата обращения 15.12.2022)
- 3) Pavlova A. et al. Storm Surges and Extreme Wind Waves in the Caspian Sea in the Present and Future Climate // Civil Engineering Journal 2022. Т. 8. № 11. С. 2353-2377
- 4) Мысленков С. А., Архипкин В. С., Павлова А. В., Добролюбов С. А. Волновой климат Каспийского моря по данным моделирования // Метеорология и гидрология 2018. №10. С. 60-70
- 5) Лопатухин Л. И. Ветровое волнение. Санкт-Петербургский государственный университет. Санкт-Петербург. 2012. 165с .
- 6) Myslenkov S., Medvedeva A., Arkhipkin V., et. al. Long-term statistics of storms in the Baltic, Barents and White Seas and their future climate projections // Geography, Environment, Sustainability 2018. Vol 11. № 1. P. 93-112

ХАРАКТЕРИСТИКИ СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В КУРИЛО-КАМЧАТСКОМ РЕГИОНЕ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД 2020 И 2021 ГОДАХ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Круглова К.А.^{1,2}, Атаджанова О.А.², Зимин А.В.²

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: субмезомасштабные вихри, Курило-Камчатский регион, радиолокация.

Районы регистрации и пространственно-временная изменчивость характеристик малых (субмезомасштабных) вихревых структур в области Курильских островов и полуострова Камчатка до сих пор остаются слабо изученным вопросом. Хотя считается, что субмезомасштабные вихри характеризуются значительными вертикальными скоростями, сопоставимыми со скоростями прибрежных апвеллингов, что определяет их важную роль в вертикальном обмене через пикноклин [1]. Это может иметь важное значение в рыбном промысле региона. Например, в работе [2] был проведен анализ отдельных спутниковых ИК-изображений, который показал, что субмезомасштабные процессы определяют взаимодействие мезомасштабных вихрей с водами зоны интенсивного приливного перемешивания, расположенной на шельфе Курильских островов. Субмезомасштабные циклонические вихри формируются на фронтах приливного перемешивания и в районе пролива Буссоль. В работе [3] с помощью ИК-сенсора высокого разрешения спутника LANDSAT Thematic Mapper (TM) было выявлено наличие субмезомасштабных вихрей с диаметрами от 2 до 30 км. Однако в вышеописанных статьях приводятся данные лишь по некоторым снимкам и не формируется целостная картина распределения субмезомасштабных вихрей в исследуемом районе. Поэтому цель данной работы заключается в обобщении данных о встречаемости и характеристиках субмезомасштабных вихревых структур в Курило-Камчатском регионе, полученным по радиолокационным изображениям за теплый сезон 2020 и 2021 гг.

В качестве исходных данных использовались радиолокационные изображения со спутника Sentinel-1 A/B в режиме съемки IW с разрешением 20 м за июнь-сентябрь 2020 г. (620 шт.) и за июнь-сентябрь 2021 г. (631 шт.). Для анализа изображений использовалась методика из работы [4]. Регистрировались координаты центра проявлений каждого вихря, диаметр и тип вращения.

В 2020 г. было зарегистрировано 253 проявления субмезомасштабных вихревых структур, из них – 188 циклонического типа вращения и 65 – антициклонического. При этом в июне наблюдалось 12 вихрей циклонического типа вращения со средним диаметров 14,4 км. В июле наблюдалось наименьшее количество вихрей – 8 циклонического типа и 1 – антициклонического со средним диаметром 8,3 км. Причем средний диаметр антициклонических вихрей был более чем в два раза меньше циклонических. В августе наблюдалось самое большое количество вихрей – 193, из которых 131 – циклонического типа вращения и 62 – антициклонического со средним диаметром 1,9 км. В сентябре было зарегистрировано 39 вихрей. Из них 37 – циклонического типа вращения и 2 – антициклонического со средним диаметром 5,3 км. В целом за год средний диаметр циклонов более чем в 1,5-2 раза превышает средний диаметр антициклонов.

В 2021 г. было зарегистрировано 115 проявлений субмезомасштабных вихревых структур, из них 100 – циклонического типа вращения и 15 – антициклонического. В июне наблюдалось 18 вихрей циклонического типа и 7 – антициклонического со средним диаметром 8,4 км. В июле было зарегистрировано наибольшее количество вихрей – 41, из которых 36 – циклонического типа вращения и 5 – антициклонического со средним диаметром 9,9 км. В августе наблюдалось всего 26 проявлений вихревых структур, из которых 23 – циклонического и 3 – антициклонического типа вращения со средним диаметром 4,8 км. В сентябре наблюдалось всего 23 вихря циклонического

типа вращения со средним диаметром 5,5 км. Можно отметить, что средний диаметр циклонов и антициклонов отличался незначительно.

Количество вихрей в 2020 г. более чем в 2 раза превышает количество вихрей в 2021 г. За оба года было выявлено преобладание вихрей циклонического типа вращения над антициклоническими. В 2020 г. наблюдалось достаточно равномерное распределение вихрей вблизи Курильских островов, с максимумом вблизи острова Хоккайдо, в отличие от 2021 г., в котором большая часть вихрей наблюдалась в проливе Буссоль. Также, в 2020 г. большое количество вихрей наблюдалось в Камчатском, Кроноцком и Авачинском заливах. В 2021 г. вихрей в этих заливах практически не наблюдалось. В оба года незначительное количество вихрей зарегистрировалось вблизи западного побережья полуострова Камчатка.

В 2020 г. вихри с наибольшими диаметрами (более 15 км) наблюдались у 1-го Курильского пролива, острова Экарма, а также в проливе Надежды. В остальном, распределение средних диаметров достаточно равномерно и не превышает 6 км. В 2021 г. вихри с диаметрами свыше 15 км наблюдались в районе 1-го и 4-го Курильских проливов, пролива Рикорда, а также в районе островов Шикотан и Уруп. Вблизи западного побережья полуострова Камчатка средний диаметр вихрей преимущественно был менее 6 км. Вблизи Курильских островов диаметры варьировались от 2 до 14 км.

Выполненное обобщение показывает, что субмезомасштабные вихри являются достаточно распространенным явлением на акватории Курило-Камчатского региона, их встречаемость и характеристики подвержены значительной изменчивости. Полученная статистика дает ключевые предпосылки районирования рассматриваемой акватории по особенностям появления субмезомасштабных вихревых структур и может служить основанием для совершенствования существующих гидродинамических моделей.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 23-17-00174.

Список литературы

- 1) Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лаврова О.Ю., Митягина М.И // Дистанционное зондирование субмезомасштабных вихрей в морях России // Международный симпозиум «Мезомасштабные и субмезомасштабные процессы в гидросфере и атмосфере МСП-2018», посвященный 90-летию члена-корреспондента АН СССР, проф. К.Н. Федорова. 2018. С.184 - 187.
- 2) Жабин И.А., Андреев А.Г. Взаимодействие мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей в Охотском море по данным спутниковых наблюдений // Исследование Земли из космоса. 2014. №4. С. 75—86.
- 3) Nakamura T., Matthews J.P., Awaji T., Mitsudera H. Submesoscale eddies near the Kuril Straits: Asymmetric generation of clockwise and counterclockwise eddies by barotropic tidal flow // J. Geophys. Res. C12014. 117 p. 2012. doi: 10.1029/2011JC007754.
- 4) Зимин А.В., Атаджанова О.А., Романенков Д.А., Козлов И.Е. и др. Субмезомасштабные вихри в Белом море по данным спутниковых радиолокационных измерений // Исследование Земли из космоса. – 2016. – № 1 – 2. – С. 129 – 135.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА

Кузнецова А.М.¹, Досаев А.С.¹, Поплавский Е.И.¹, Троицкая Ю.И.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г.Нижний Новгород

Ключевые слова: численное моделирование, аномально высокие скорости ветра, тропический циклон, атмосферная модель, WRF, волновая модель, WAVEWATCH III.

Одним из наиболее важных параметров при моделировании экстремальных явлений (случаев аномально сильного ветра и, например, тропических циклонов) является коэффициент аэродинамического сопротивления C_D , который определяет вертикальный обмен горизонтальным импульсом между атмосферой и океаном. В настоящей работе проведены анализ и уточнение параметризации коэффициента шероховатости подстилающей поверхности в атмосферной модели WRF-ARW (WRF) [1] в условиях экстремальных погодных явлений.

При высоких скоростях ветра приповерхностный слой атмосферы насыщен брызгами и каплями дождя, на поверхности воды присутствуют зоны пенообразования, а поверхностный слой воды насыщается пузырьками воздуха, что радикально меняет процессы обмена импульсом, теплом, влагой на границе океана и атмосферы. При этом современные модели циркуляции атмосферы, например, WRF, опираются на балк-формулы [2], которые получены эмпирически для скоростей ветра не превышающих 20 м/с, с экстраполяцией для условий сильных ветров, характерных для океанских штормов, в предположении о том, что мелкомасштабные процессы, обуславливающие турбулентный перенос, остаются такими же, как при умеренных скоростях ветра. Но исследования, проводимые в последнее время, показывают качественное отличие мелкомасштабных процессов при высоких скоростях ветра по сравнению с умеренными [3].

Были проведены оценки, на сколько отличаются коэффициенты аэродинамического сопротивления, рассчитываемые в модели WRF, и аналогичные значения C_D с учетом мелкомасштабных процессов, рассчитанные при помощи данных о ветре и волнении, полученных в атмосферной и волновой моделях соответственно. Для этого проведены расчеты скорости ветра моделью WRF в северной части Атлантического океана на пути следования урагана Ирма. Данные о параметрах волнения были получены из волновой модели WAVEWATCH III (WW3) [4]. Был рассмотрен период с 01.09.2017 по 08.09.2017, при этом ураган сформировался 30.08.2017 и распался 12.09.2017.

Проведено сравнение коэффициента аэродинамического сопротивления, рассчитываемого в WRF «по умолчанию», это, применительно к случаю урагана, формула C_D Донелана [2], и аналогичные значения C_D с учетом мелкомасштабных процессов. Была использована параметризация C_D , полученная на основе применения лагранжевой стохастической модели [5], заданная полиномом в зависимости от возраста волнения и скорости ветра на 10 м.

Полученные результаты демонстрируют, что параметризация C_D с учетом мелкомасштабных процессов проходит выше стандартной при скоростях меньше 17 м/с и больше 35 м/с, при этом лежит ниже в диапазоне скоростей от 17 м/с до 35 м/с. Таким образом, данный результат показывает, что использование новой параметризации C_D обеспечит лучшее соответствие данных расчета данным измерений, поскольку значения высот волн, развивающееся под малыми скоростями ветра, будут лежать немного выше (в зависимости от скорости ветра), тогда как значения высот волн в области умеренных ветров изменятся незначительно. При этом значения высот волн в области сильных ветров также станут выше. Данный результат обосновывает необходимость имплементации новой параметризации коэффициента аэродинамического сопротивления морской

поверхности с учетом мелкомасштабных процессов при высоких скоростях ветра в атмосферную модель WRF.

Работа поддержана грантом президента МК-2489.2022.1.5.

Список литературы

- 1) Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J. , Gill D. O., Barker D. M., Duda M. G., Huang X.-Y., Wang W., Powers J. G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 // NCAR TECHNICAL NOTE №NCAR/TN-475+STR. 2008. 113 pp.
- 2) Donelan M. A., Dobson F. W., Smith S. D., Anderson R. J. On the dependence of sea surface roughness on wave development // Journal of physical Oceanography 23(9). 1993. PP. 2143-2149
- 3) Troitskaya Y., Kandaurov A., Ermakova O., Kozlov D., Sergeev D. and Zilitinkevich S. Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds. Scientific reports 7(1). 2017. p.1614
- 4) Tolman, H. L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14 // Technical note, MMAB Contribution 2009. 276(220)
- 5) Troitskaya Yu., Druzhinin O., Gladskikh D., Ermakova O., Soustova I. Simulation of inertial droplet dispersion and the spray mediated fluxes in the atmospheric boundary layer above waved water surface: a Lagrangian stochastic model versus direct numerical simulation. 10.21203/rs.3.rs-2159787/v1

ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ

Кукушкин В.М., Гулев С.К., Маркина М.Ю.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: водные массы, потоки, взаимодействие океана и атмосферы.

В данной работе рассматривается межсезонная изменчивость потоков плотности [1] на поверхности океана на примере 1979-2018, что является отражением интенсивности атмосферных процессов, влияющих на формирование поверхностных вод Мирового океана. Для оценки интенсивности процесса формирования поверхностных вод в данном исследовании используется величина потока плотности. Данная величина отражает изменение плотности вод в поверхностном слое океана в зависимости от потоков тепла и пресной воды на границе океан-атмосфера и является обратной величиной потока плавуности. Расчёт величины среднемесячной трансформации производится путем интегрирования вдоль изопикны по времени и пространству величин потоков плотности [2]. Таким образом получается величина, характеризующая величину потока плотности для вод определенной плотности. Это дает возможность проводить анализ трансформаций конкретных поверхностных водных масс.

Главной целью данного исследования является оценка достоверности воспроизведения трансформации поверхностных водных масс Северной Атлантики в результате взаимодействия океана и атмосферы в реанализах и климатических моделях.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Подготовка данных на границе океан-атмосфера для расчета потока плотности.
2. Расчет потоков плотности и трансформации поверхностных вод по данным реанализа CFSR (Climate Forecast System Reanalysis).
3. Расчет потоков плотности и трансформации поверхностных вод по данным моделей CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project).
4. Оценка роли осолонения при ледообразовании в потоке плотности (CFSR).
5. Анализ долговременной климатической динамики поверхностной трансформации.
6. Расчет прогностических оценок формирования водных масс

Для оценки роли осолонения при льдообразовании в потоке плотности использовались данные о сплоченности льда и о толщине льда в Северной Атлантике за ноябрь-февраль. В 1989 был достигнут максимум эффекта осолонения достигла 12%. Для сравнения данных CFSR были взяты данные исторических экспериментов моделей из CMIP6. Использовались модели INM (Institute of Numerical Mathematics), MPI (Max Planck Institute) и MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate). Заметно, что данные моделей CMIP6 в южных акваториях по величине потока плотности превосходят данные CFSR. Наибольшие различия наблюдаются в районе течения Гольфстрим и Североатлантического течения. Для оценки долговременной климатической динамики поверхностной трансформации и формирования водных за последние 150 лет были использованы данные реанализа 20CR (20th Century Reanalysis), третья версия которого предоставляет данные с 1836 года по 2015. За годы 20-21 века виден положительный тренд в потоке тепла в Северной Атлантике, что говорит о повышении значений потока плотности.

Для составления прогностических оценок формирования водных масс были взяты данные модели Института вычислительной математики INM CM-5-0. Данная модель предоставляет все необходимые данные для расчета потока плотности и трансформации до 2100 года. Для расчета потоков плотности были использованы данные сценариев SSP (Shared Socioeconomic Pathways) ssp126, ssp370 и ssp585. Для всех сценариев SSP наблюдается снижение величины трансформации.

В работе выявлены акватории с характерными максимумами и минимумами потока плотности, которые приурочены к субполярным и экваториальным водам соответственно. Установлена доля эффекта осолонения при льдообразовании как 9% от разницы испарения и осадков. Проанализирована межгодовая изменчивости трансформации поверхностных вод в различных плотностных диапазонах на основе нескольких моделей и обсуждаются факторы, определяющие данную изменчивость.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №23-47-00030.

Список литературы

- 1) Walin G. S. On the relation between sea-surface heat flow and thermal circulation in the ocean //Tellus. – 1982. – Т. 34. – №. 2. – С. 187-195
- 2) Speer K., Tziperman E. Rates of water mass formation in the North Atlantic Ocean //Journal of Physical Oceanography. – 1992. – Т. 22. – №. 1. – С. 93-104

ОСОБЕННОСТИ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН ОХОТСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Кулик К.В.¹, Фролова Н.С.¹, Свергун Е.И.², Зимин А.В.².

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: Охотское море, короткопериодные внутренние волны, спутниковые радиолокационные изображения, поверхностные проявления.

Короткопериодные внутренние волны (КВВ), являясь важной частью динамики вод на шельфе Мирового океана, в силу сложности судовых наблюдений и несовершенства математических моделей остаются слабоизученным процессом. Появление спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой дало возможность подробнее изучать КВВ в любой точке Мирового океана, определять их районы частой встречаемости и геометрические характеристики, отслеживать сезонную изменчивость.

В Охотском море КВВ регистрируются по данным космических радаров во многих Курильских проливах, на восточном берегу острова Сахалин, в заливах Анива и Сахалинском [1, 2, 3]. Основным источником генерации КВВ в Охотском море является взаимодействие внутренней приливной волны с шельфом, а также взаимодействие вод Тихого океана с охотоморскими водами [4]. Данные измерений показывают, что в шельфовой зоне Охотского моря регистрируются интенсивные внутренние волны высотой до 11 метров [2, 5]. Однако до сих пор отсутствуют сведения о районах частой встречаемости проявлений КВВ для всей акватории Охотского моря на основе анализа современных спутниковых данных.

Целью данной работы является анализ характеристик и пространственно-временной изменчивости поверхностных проявлений КВВ по данным радиолокационных наблюдений в Охотском море за лето 2019 года.

Для анализа характеристик проявлений КВВ было использовано 536 спутниковых изображений Sentinel-1A и Sentinel-1B с поляризацией HH и VV и пространственным разрешением до 40 м в период с 1 июня 2019 года по 31 августа 2019 года. Спутниковые снимки были отобраны и загружены с сайта Alaska Satellite Facility (ASF) Data Search [6].

Проявления КВВ регистрировались в ПО ESA SNAP визуально, как чередующиеся дугообразные полосы усиления и ослабления радиолокационного сигнала. Определялись координаты проявлений, количество волн в пакете, длина волны, длина лидирующего гребня и направление распространения. Пространственно-временная изменчивость характеристик КВВ оценивалась по картам и диаграммам, построенным в ПО Matlab.

В результате на снимках было обнаружено 346 проявлений внутренних волн. Максимум наблюдался в июне – 165 проявлений (48% от общего числа волн), минимум в августе – 73 проявления (21% от общего числа волн).

Длина лидирующего гребня варьировалась в диапазоне 2-60 км, среднее значение составило 12 км. Длина волн находилась в пределах от 100 до 3000 м, при среднем значении 450 м. За исследуемый период внутренние волны содержали от 2 до 26 волн в пакете, в среднем 7.

Статистический анализ показал, что наибольшую повторяемость имели проявления с длиной лидирующего гребня от 7 до 11 км (96 случаев, или 27%), длиной волны до 200 м (126 случаев, или 36%), с 4-6 волнами в пакете (131 случай, или 37%).

Наиболее часто внутренние волны регистрировались на шельфе острова Сахалин в заливе Анива, у м. Свободный, в заливе Терпения и у м. Елизаветы, а также в заливе Шелихова у полуострова

Пьягина и м. Южный. Учитывая выраженную приливную динамику и связь с неоднородностями рельефа дна, можно предположить, что в Охотском море КВВ в основном генерируются внутренними приливными волнами.

В качестве продолжения данной работы предполагается более подробное изучение внутригодовой изменчивости характеристик проявлений внутренних волн и механизмов их генерации.

Список литературы

- 1) Mitnik L. M., Dubina V. A. Spatial-temporal distribution and characteristics of internal waves in the Okhotsk and Japan Seas studied by ERS-1/2 SAR and Envisat ASAR // Proc. Envisat Symposium 2007. P. 23-27.
- 2) Наговицын А.П., Пелиновский Е.Н. Наблюдения солитонов внутренних волн в прибрежных водах Охотского моря. // Метеорология и гидрология. 1988. Т. 4. С. 124–126.
- 3) Nakamura, T., Awaji, T., Hatayama, T., Akimoto, K., Takizawa, T., Koho, T., et al. The generation of large-amplitude unsteady lee waves by subinertial tidal flow: A possible vertical mixing mechanism in the Kuril Straits. // Journal of Physical Oceanography. 2000. V. 30. P. 1601–1621.
- 4) Куркин А.А. Внутренние волны в Охотском море: наблюдения, моделирование и анализ / Куркин А.А., Куркина О.Е., Рувинская Е.А., Талалушкина Л.В., Гиниятуллин А.Р // Тезисы докладов всероссийской научной конференции. – г. Севастополь, 24–28 сентября 2018 г. – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2018. – С. 56-58.
- 5) Зимин А.В., Свергун Е.И. Короткопериодные внутренние волны в шельфовых районах Белого, Баренцева и Охотского морей: оценка повторяемости экстремальных высот и динамических эффектов в придонном слое. Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11. № 4. С. 66-72. DOI: 10.7868/S2073667318040081
- 6) Alaska Satellite Facility (ASF) Data Search [Электронный ресурс]// Режим доступа: <https://search.asf.alaska.edu/#/>

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТИХООКЕАНСКИХ ВОД В МОРЯХ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

Куликова Ж.М., Гангнус И.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: модификации тихоокеанской водной массы, Чукотское море, отслеживание водных масс.

Воды северной части Тихого океана считаются одними из наиболее богатых биогенными веществами вод Мирового океана, что обуславливает высокую биологическую продуктивность дальневосточных морей России. Через Берингов пролив на акваторию морей Северного Ледовитого океана поступают воды из Берингова моря, характеризующиеся повышенными значениями биогенных элементов [1]. Арктический регион особенно сильно подвержен происходящим климатическим изменениям, пристальное внимание на данный момент направлено на потенциальные возможности использования промысловых ресурсов данного региона.

В целях идентификации и отслеживания производных тихоокеанских водных масс по всей акватории требовались данные температуры, солености и гидрохимических показателей, собранные примерно в одно и то же время по Восточно-Сибирскому, Чукотскому морям и морю Бофорта. С помощью базы данных World Ocean Database 2018 были подобраны данные различных экспедиций исследуемой области с 1963 по 2018 год, также в данной работе используются данные экспедиций Арктика-2007, Арктика-2008, NABOS-2015 и Трансарктика-2019. В целях изучения распространения модификаций тихоокеанской водной массы, помимо качественного визуального анализа построенных по общедоступным данным графических материалов, в данной работе был применен метод объёмного T,S-анализа. Для проведения данного анализа использовались данные World Ocean Atlas-2018 по температуре и солености исследуемого региона на сетке с шагом $0,25^\circ$ как по месяцам, так и осредненные многолетние.

Модификации тихоокеанской водной массы, поступающая через Берингов пролив на акваторию Чукотского моря, распространяются по 3 основным направлениям: на север и северо-запад, а также северо-восток [2]. Для севера и северо-востока летняя и зимняя модификации тихоокеанской водной массы характеризуются определенными значениями гидрохимических квазиконсервативных параметров, в то время как модификации тихоокеанских вод в ходе распространения по северо-западной Лонговской ветви, вследствие иных климатических условий и другого гидрологического режима, отличаются по характерным значениям этих же показателей [3].

Тихоокеанские воды, распространяющиеся по Лонговской ветви, достигают западной оконечности острова Врангеля, то есть доходят максимально до 175° в.д. По мере продвижения на восток от мыса Хоуп модификации тихоокеанских вод трансформируются в результате смешения с окружающими водами, но их присутствие можно зафиксировать еще на 134° з.д. Геральдовская ветвь распространения тихоокеанских вод сначала движется на север, а затем вдоль континентального склона Восточно-Сибирского моря продвигается на запад, достигая 170° в.д.

Параметр NO уменьшается в той части тихоокеанских вод, которая в течение длительного периода времени является придонной, вследствие контакта с донными отложениями и потребления кислорода, максимум параметра NO перестает быть трассером тихоокеанских вод.

В районе континентального склона западной части Чукотского и восточной – Восточно-Сибирского моря обнаружено присутствие водной массы с нехарактерной высокой соленостью для тихоокеанских вод (более 34 епс), при этом обладающую высоким содержанием силикатов, отрицательным N^* и минимумом NO.

Список литературы

- 1) Пивоваров С.В. Химическая океанография Арктических морей России. СПб. Гидрометеоиздат. 2000. С.88.
- 2) Coachman L. K., Barnes C. A. The contribution of Bering Sea water to the Arctic Ocean //Arctic. 1961. V.14. №3. P.147-161.
- 3) Pisareva M. N. et al. Flow of Pacific water in the western Chukchi Sea: Results from the 2009 RUSALCA expedition //Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2015. V.105. P.53-73.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ОБЪЕМОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ПЛАВУЧЕСТЬЮ: КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Куприянова А.Е.^{1,2}, Гриценко В.А.²

¹Балтийский федеральный университет им. И.Канта, г. Калининград

²Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: сезонная конвекция, количественные характеристики, скорости погружения, объемы отрицательной плавучести.

Известно, что в процессе сезонного выхолаживания воды происходит формирование тонкого приповерхностного слоя более холодной, чем подстилающей, воды. При наступлении плотностной неустойчивости на нижней границе такого слоя формируются малые объемы воды, погружающиеся в глубину. Изучением количественных характеристик этого процесса занимались многие авторы [1-3]. Исходя из полученных ими оценок [1] в численных расчетах, оказалось, что средняя вертикальная скорость погружения отдельных объемов до наступления конвективной неустойчивости примерно $5 \cdot 10^{-7}$ м с⁻¹, после наступления неустойчивости до $5 \cdot 10^{-3}$ м с⁻¹. В работе [2] при различных начальных значениях отрицательной плавучести объемов были получены средние вертикальные скорости погружения пятен от 0.4 см с⁻¹ (при дефиците плавучести 0.5 см³ с⁻², числа Грасгофа $6 \cdot 10^8$) до 1 см с⁻¹ (при дефиците плавучести 12 см³ с⁻², числа Грасгофа $8 \cdot 10^9$). В работе [3] в лабораторных экспериментах отмечалась вертикальная скорость истечения жидкости порядка 1 мм с⁻¹ на этапе отрыва объема от специального устройства в бассейне со стратифицированной жидкостью.

Целью данной работы стало экспериментальное исследование скоростей погружения отдельных объемов отрицательной плавучести при различных значениях объема и перепада плотности, как в лабораторных условиях, так и в численных расчетах.

Лабораторные эксперименты проводились в гидрлотке (ЛФМ, АО ИО РАН, г. Калининград), наполненной пресной водой, со специальными входными устройствами, расположенными на поверхности воды. Малые объемы отрицательной плавучести (2-3 мл) с различными перепадами плотности ($\Delta\rho$) между объемом и пресной водой (10^{-4} г см⁻³ и $2 \cdot 10^{-4}$ г см⁻³) формировались в поверхностном слое лотка. Фотосъемка процесса реализовывалась теневым методом сканирования. Процедура проведения экспериментов более детально описана в работе авторов [4]. В дальнейшем предполагается использование *PIV*-метода для более точного сканирования скоростей.

В ходе постобработки фотографий экспериментов удалось зафиксировать вертикальные скорости погружения объемов (2 мл): при $\Delta\rho = 10^{-4}$ г см⁻³ в среднем 3.13 мм с⁻¹ на начальном этапе погружения до включения механизма генерации бароклинной завихренности, на более развитой фазе до 5.4 мм с⁻¹, средняя скорость потока 3.25 мм с⁻¹; при $\Delta\rho = 2 \cdot 10^{-4}$ г см⁻³ в среднем 5.65 мм с⁻¹ на начальном этапе погружения, на более развитой фазе до 8.2 мм с⁻¹, средняя скорость потока 4.08 мм с⁻¹.

Численные расчеты проводились на двумерной модели [5], построенной в переменных завихренность – функция тока – избыточная плотность на явной конечно-разностной схеме. Модельные результаты погружения объемов при перепадах плотности $2 \cdot 10^{-4} - 10^{-3}$ г см⁻³ показали изменение вертикальной скорости в пределах от 5 до 10 мм с⁻¹.

Анализ количественных характеристик скорости погружения пятен для нескольких течений с различными начальными условиями показал, что изменение вертикальной скорости погружения отдельного пятна обратно пропорционально времени, имеет вид ветки гиперболы от времени и зависит от значений отрицательной плавучести.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00150.

Список литературы

- 1) Бунэ А.В., Дикарев С.Н., Зацепин А.Г., Тишаев Д.В. Пример численного и лабораторного моделирования процесса развития конвекции // Изв. АН СССР. ФАО. 1985. Т. 21. № 8. С. 892-895
- 2) Бунэ А.В., Гинзбург А.И., Полежаев В.И., Федоров К.Н. Численное и лабораторное моделирование развития конвекции в охлаждающемся с поверхности слое воды // Изв. АН СССР. ФАО. 1985. Т. 21. № 9. С. 956-963
- 3) Абрамян Т.О., Кудин А.М. Лабораторное исследование взаимодействия пятен перемешанной жидкости при их растекании в стратифицированной среде // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1983. Т. 19. №8. С. 888-891
- 4) Куприянова А.Е., Гриценко В.А. Падение пятен солёной воды на наклонное дно в окружении пресной: динамика и структурные особенности распространения плотностного фронта вверх по склону. // Океанологические исследования. 2022. Т. 50. № 2. С. 106-124
- 5) Волкова А.А., Гриценко В.А. Особенности циркуляции, возникающей при погружении с поверхности конечного объема воды с отрицательной плавучестью // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2019. Т. 12. № 3. С. 26-35

ВЗАИМОСВЯЗЬ АРКТИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ С МЕРИДИОНАЛЬНЫМИ ОКЕАНИЧЕСКИМИ И АТМОСФЕРНЫМИ ПОТОКАМИ ТЕПЛА НА ВХОДЕ В АТЛАНТИЧЕСКИЙ СЕКТОР АРКТИКИ

Латонин М.М.^{1,2}, Башмачников И.Л.^{1,2}, Бобылев Л.П.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: океанический и атмосферный перенос тепла, компенсация Бьеркнеса, Арктическое усиление, десятилетняя изменчивость, климат Арктики, цикличности, Евразийский бассейн Северного Ледовитого океана, Северо-Европейский бассейн.

Причины Арктического усиления широко обсуждаются, но роль ряда механизмов остаётся малоизученной. В этом исследовании в развитии Арктического усиления изучалась роль Атлантического меридионального океанического и атмосферного переноса тепла в Арктику. По данным реанализов ORAS4 и ERA5 были рассчитаны меридиональные интегральные потоки тепла в слое Атлантических вод и в нижней тропосфере. Анализ характеристик изменчивости указывает на тесную связь меридиональных потоков тепла с региональным Арктическим усилением в Евразийском бассейне Арктики на десятилетних временных масштабах (10–15 лет). Показано, что низкочастотная изменчивость Арктического усиления регулируется цепочкой океанический перенос тепла — атмосферный перенос тепла — Арктическое усиление [1]. Атмосфера откликается на воздействие океана с задержкой в три года за счёт механизма компенсации Бьеркнеса. Подобный фазовый сдвиг ранее уже был получен в климатической модели HadCM3 [2]. В свою очередь атмосферный перенос тепла и влаги напрямую влияет на величину Арктического усиления, причём с опережением первого на один год. Таким образом, изменчивость океанического переноса тепла на южной границе Северо-Европейского бассейна может быть предиктором величины Арктического усиления над Евразийским бассейном Северного Ледовитого океана с заблаговременностью в четыре года. Десятилетняя изменчивость климата Арктики, выраженная через индекс колебания Северного Ледовитого океана [3], подкрепляет полученные результаты.

Публикация выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГУ № 94033410.

Список литературы

- 1) Latonin, M.M., Bashmachnikov, I.L., Bobylev, L.P. Bjercknes compensation mechanism as a possible trigger of the low-frequency variability of Arctic amplification // Russ. J. Earth Sci. – 2022. – V. 22. – ES6001. DOI: 10.2205/2022ES000820.
- 2) van der Swaluw, E., Drijfhout, S., Hazeleger, W. Bjercknes compensation at high northern latitudes: the ocean forcing the atmosphere // J. Clim. – 2007. – V. 20. – P. 6023–6032. DOI: 10.1175/2007JCLI1562.1.
- 3) Proshutinsky, A., Dukhovskoy, D., Timmermans, M.-L., Krishfield, R., Bamber, J.L. Arctic circulation regimes // Phil. Trans. R. Soc. A. – 2015. – V. 373. – 20140160. DOI: 10.1098/rsta.2014.0160.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ДОЛГОПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ СУММАРНОЙ ЛЕДОВИТОСТИ БАРЕНЦЕВА И ГРЕНЛАНДСКОГО МОРЕЙ ЗА ПЕРИОД 1950-2021 ГОДЫ

Лис Н.А., Тимохов Л.А., Миронов Е.У., Егорова Е.С.

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Ключевые слова: ледовитость, Гренландское море, Баренцево море, долгопериодные колебания, Северо-Европейский бассейн, статистическая структура.

В последние несколько десятилетий изменения климата привлекают внимание исследователей все больше. В первую очередь, это внимание направленно на изучение таковых проявлений в Арктике в связи с отмечающимся значительным повышением температуры атмосферы: в несколько раз интенсивнее, чем в других регионах [1; 2]. Отличительной особенностью Гренландского и Баренцева морей, которые являются основными акваториями Северо-Европейского бассейна, является круглогодичное наличие морского льда. Но, в отличие от других арктических морей, площадь Гренландского и Баренцева морей в зимний сезон не покрывается льдом полностью из-за влияния теплых вод атлантического происхождения [3, 4]. Колебания ледовитости являются одним из индикаторов изменений климата, а ледяной покров в Северо-Европейском бассейне одним из первых реагирует на эти изменения. В связи с чем, его можно считать районом-индикатором климата Арктики [5].

В данной работе была исследована долгопериодная изменчивость суммарной ледовитости Гренландского и Баренцева морей. Данные по ледовитости предоставлены отделом ледового режима и прогнозов ААНИИ в виде электронного архива площади льдов (ледовитости) для Гренландского и Баренцева морей за период 1950–2021 годы с дискретностью в месяц.

В межгодовых изменениях суммарной ледовитости Гренландского и Баренцева морей в летний (август) и зимний (апрель) сезоны за период 1950–2021 годы выявлено наличие отрицательного линейного тренда, как в апреле, так и в августе. Период за 1950-1985 годы отмечается отсутствием статистически значимого линейного тренда, как в апреле так и в августе. Величина тренда для апреля превышает таковую для августа во всех рассматриваемых периодах. В межгодовом ходе ледовитости отмечается тенденция к уменьшению, более интенсивная для зимнего сезона. Так же стоит отметить, что за период 1950-2021 годы для суммарной ледовитости Баренцева и Гренландского морей величина тренда в апреле составила $-26 \%/72$ года. За период 1986-2021 годы величина тренда составила $-17 \%/36$ лет. То есть на период после 1985 года приходится более интенсивное уменьшение ледовитости. Для летнего сезона уменьшение суммарной ледовитости происходит ещё более интенсивно. За период 1950-2021 годы величина тренда составляет $-13 \%/72$ года. Тогда как за последние 36 лет (период 1986-2021 годы) величина тренда составила $-12 \%/36$ лет. То есть наиболее активное уменьшение приходится на период после 1985 года.

С помощью спектрального анализа (быстрое преобразование в ряд Фурье) были выделены периодические колебания в изменчивости суммарной ледовитости Гренландского и Баренцева морей в зимний и летний сезоны с периодами 18; 10; 8; 6,5; 6 лет и 24; 14; 10; 7 и 6 лет соответственно. Вероятно, выделенные циклические колебания индуцируются некими крупномасштабными причинами. Наибольший вклад $[U+2053]$ 30% вносят колебания периодом $[U+2053]$ 6 лет. Более высокочастотные колебания с периодами меньше 3 лет вероятнее всего вызваны влиянием атмосферной циркуляции и взаимодействия океана и атмосферы [6].

В связи со значительным вкладом некоторых гармоник в общую дисперсию ряда, при анализе сопряженности стоит обратить особое внимание на различные гидрометеорологические и астрогеофизические факторы с циклическими колебаниями в 23, 17-18, 10 и 5-6 лет. А также при разработке уравнений с помощью множественной линейной регрессии включить в число предикторов

значимые гармониками. Полученные в исследовании результаты вносят важный вклад в исследование долгопериодной изменчивости ледовитости морей Северо-Европейского бассейна.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22–27–00443.

Список литературы

- 1) JCOMM Expert Team on Sea Ice. Sea-Ice Nomenclature: snapshot of the WMO Sea Ice Nomenclature No. 259. Geneva, Switzerland: WMO-JCOMM, 2014. 121 p. doi: 10.25607/OBP-1515
- 2) Smedsrud L.H., Muilwijk M., Brakstad A., Madonna E., Lauvset S. K., Spensberger C., Born A., Eldevik T., Drange H., Jeansson E., Li C., Olsen A., Skagseth O., Slater D.A., Straneo F., Vage K., Arthun M. Nordic Seas heat loss, Atlantic inflow, and Arctic sea ice cover over the last century // *Reviews of Geophysics*. 2022. Т. 60. № 1. e2020RG000725. doi:10.1029/2020RG000725
- 3) Никифоров Е. Г., Шпайхер А. О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 269 с.
- 4) Миронов Е.У. Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: изд. ААНИИ, 2004. 319 с.
- 5) Зубакин Г.К. Крупномасштабная изменчивость состояния ледяного покрова морей Северо-Европейского бассейна. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 160 с.
- 6) Фролов И.Е., Гудкович З.М., В.П. Карклин, Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Научные исследования в Арктике: Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова Евразийского шельфа. СПб.: Наука, 2007. 135 с.

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ

Лондикова Н.В.¹, Медведев И.П.²

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

²Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Балтийское море, периодические течения.

На данный момент накоплено большое количество данных по течениям в Балтийском море, которые предоставляются европейскими исследовательскими центрами и институтами. Несмотря на наличие большого количества данных и длительных временных рядов, исследований в области анализа периодических течений немного. В данной работе рассматриваются данные, полученные со станций Шведского гидрометеорологического университета, установленных в разных точках Балтийского моря, где особый интерес представляют станции в проливах, так как именно в этих областях более явно выражены элементы периодических течений [1].

В данной работе используются данные с сайта Шведского гидрометеорологического института <https://www.smhi.se/>. Для анализа были взяты станции, установленные в следующих точках Балтийского моря: пролив Кальмарсунд 56° 67' с. ш. 16° 38' в. д. (станция № 35061), пролив Эресунн 55° 60' с. ш. 12° 85' в. д. (станция № 35067), пролив Седра-Кваркен в Ботническом заливе 63° 50' с. ш. 19° 80' в. д. (станция № 33021). Период наблюдений для станции № 33021 один год, станции № 35061 два года, станции № 35067 десять лет. Рассматриваемые горизонты для станции № 33021 с 1 до 41 м (каждые 2 метра), станции № 35061 горизонты 2, 4, 6 метров, станции № 35067- 8 мет-ров. Дискретность наблюдений для всех станций составляет один час с небольшим количеством пропусков в измерениях.

В процессе работы с данными станций была проведена их первичная обработка, которая включала в себя отбор валидных данных для анализа. Валидными принимались данные со станций с постоянной дискретностью измерений и постоянными горизонтами. Далее был проведен гармонический и спектральный анализ [2], в результате которых были выделены гармонические составляющие приливов, их фаза, большая и малая полуоси эллипса течений и наклон оси эллипса на каждом горизонте исследуемой станции [2].

По результатам анализа графиков спектральной плотности, можно сделать вывод, что у всех полученных спектров основная энергия сосредоточена на низких частотах, на высоких частотах наблюдается спад. Также можно выделить особенность наличия острых пиков, соответствующих частотам приливных гармоник суточной K1 (период 23,93 ч) и полусуточной M2 (период 12,42 ч).

При помощи гармонического анализа были выделены приливные составляющие течений [2]. Были выделены следующие приливные гармоники: сезонные (Sa, Ssa), суточные (Q1, O1, P1, S1, K1), полусуточные (N2, M2, S2, K2). Основное внимание уделялось суточным гармоникам O1, K1 и полусуточным M2, S2.

В процессе анализа приливных составляющих было выявлено, что на станции №35067 (пролив Эресунн) величины скорости гармоник M2, S2, O1, K1 существенно больше величин скорости аналогичных гармоник других станций, что объясняется проникновением приливов из Северного моря, а также положением станции в узком проливе.

Наименьшие показатели скорости приливных составляющих M2, S2, O1, K1 отмечены на станции №33021 (пролив Седра-Кваркен в Ботническом заливе). Также на данной станции отмечена большая величина гармоники K1 по сравнению с гармоникой O1, что говорит об отсутствии ярко выраженных сейш в Ботническом заливе.

Общим для станций №33021 (пролив Седра-Кваркен в Ботническом заливе) и станции №35061 (пролив Кальмарсунд) является то, что приливные составляющие сильнее выражены в верхних

горизонтах и убывают с глубиной. Скорости суточных приливных течений превышают полусуточные что может говорить о резонансном усилении суточных приливов в Балтийском море. Скорости течений полугодовой приливной составляющей прилива также выше в верхних горизонтах.

Список литературы

- 1) Дуванин А.И. Приливы в море // Гидрометеорологическое издательство Ленинград, 1960. С. 7
- 2) Pugh D., Woodworth Ph. Sea-level science. 2014. ISBN: 9781107028197. P 62-89

ОПЫТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЯВЛЕНИЙ ЭЛЬ-НИНЬО И ЛА-НИНЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Лубков А.С., Воскресенская Е.Н.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт природно-технических систем», г. Севастополь

Ключевые слова: ЭНЮК, Эль-Ниньо, Ла-Нинья, Южное колебание, прогноз, нейронные сети, система океан-атмосфера.

Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК) – важнейший глобальный процесс межгодового масштаба в системе океан-атмосфера экваториальной зоны Тихого океана. ЭНЮК имеет две противоположные фазы существования – теплую (Эль-Ниньо) и холодную (Ла-Нинья). Фазы ЭНЮК находят погодно-климатический отклик не только в тропической зоне Тихого океана, но и во вне-тропических широтах посредством дальнедействующих связей системы океан-атмосфера и обуславливают существенные негативные последствия на социально-экономическую сферу [1, 2]. Прогноз этих событий и заблаговременное определение их типа – приоритетная задача современных исследований.

На сегодняшний день существует, по меньшей мере, 18 гидродинамических и 8 статистических моделей, представленных на сайте Колумбийского университета (IRI), которые применяются для прогнозирования ЭНЮК. Для всех моделей долгосрочного прогноза характерно относительно высокое качество моделирования нейтральных условий или уже развивающихся явлений ЭНЮК. Для всех моделей долгосрочного прогноза характерен относительно высокий навык прогнозирования нейтральных условий или уже развивающихся явлений ЭНЮК, однако навык прогнозирования летом, когда обычно только начинают развиваться явления ЭН и ЛН, резко ухудшается. Поэтому если заблаговременность прогноза более 6 месяцев навык прогнозирования заметно уменьшается. Это ограничение названо весенним барьером предсказуемости (ВБП). При этом динамические модели справляются с прогнозом ЭНЮК на порядок лучше, чем статистические [3].

Последние несколько лет стали предлагаться весьма продуктивные решения для прогнозирования ЭНЮК в основе которых лежат методы машинного обучения. Зачастую эти решения значительно лучше прогнозируют цикл ЭНЮК, в сравнении с динамическими моделями, и способны смягчить эффект ВБП [4]. Однако недостатком современных методов машинного обучения, используемых для прогноза ЭНЮК, является отсутствие возможности интерпретировать построенную модель с точки зрения физического анализа дальнедействующих связей системы океан-атмосфера. Механизм возникновения ЭН и ЛН до сих пор до конца не изучен, поэтому, помимо улучшения прогностических способностей современных моделей, возможность изучения используемых предикторов, которые привели к успешному прогнозу ENSO, является не менее важной задачей.

В нашем исследовании предлагается модель, способная прогнозировать состояние ЭНЮК и определять заблаговременно за год приближение явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. В основе модели лежит линейная многослойная нейронная сеть, входными данными в которую служат индексы дальнедействующих связей системы океан-атмосфера. Подробности метода моделирования описаны в работе [5] Модель имеет значительное преимущество в сравнении с динамическими моделями при заблаговременном прогнозе более 6 месяцев и заметно смягчает эффект ВБП. Так, предсказуемость событий Эль-Ниньо с заблаговременностью 12 месяцев равна 76%, а с заблаговременностью в 6 месяцев – 85%.

Далее приведем краткий анализ результатов прогнозирования предложенной нами моделью состояния ЭНЮК. Модель показывает завершение Ла-Нинья в феврале 2023 года, нейтральную фазу ЭНЮК марте и апреле, а с мая 2023 года с вероятностью 83% – начало развития Эль-

Ниньо восточного типа, максимум которого будет наблюдаться зимой 2023-2024 годов. При этом, по результатам, приведенным на сайте Колумбийского университета (iri.columbia.edu, обращение 03.12.2022) 18 динамических и статистических моделей показывают нейтральную фазу ЭНЮК и только 7 моделей превысили порог 0.5°C , однако в среднем модели показывают нейтральную фазу. По результатам центра климатических прогнозов США (src.ncep.noaa.gov, обращение 03.12.2022) в ноябре только 1 из 6 моделей прогнозирует начало Эль-Ниньо.

Прогнозы предложенной модели доступны on-line по ссылке: neurolclimate.com/enso.html

Список литературы

- 1) Philander S. G. El Niño, La Niña and the Southern Oscillation // Academic Press. San Diego, CA. 1990. 289 p.
- 2) Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V., Maslova V.N., Lubkov A.S. Interannual climate anomalies in the Atlantic-European region associated with La-Nina types // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2018. V. 107 P. 012043
- 3) Tippet M. K., Barnston A. G., Li S. Performance of Recent Multimodel ENSO Forecasts. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012. V. 51(3) P. 637–654
- 4) Fang W., Sha Y., Sheng V.S. Survey on the Application of Artificial Intelligence in ENSO Forecasting. Mathematics, 2022. V. 10 P. 3793
- 5) Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В. Применение нейронных сетей для модельного прогноза Эль-Ниньо и Ла-Нинья, включая их типы // Метеорология и гидрология, 2020. №11 С.111–121

О КЛАСТЕРИЗАЦИИ ТЕРМОХАЛИННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АТЛАНТИЧЕСКОЙ ВОДЫ В АРКТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ (CTD-ДААННЫЕ NABOS)

Лыжков Д.А., Журбас Н.В., Кузьмина Н.П.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: ветви Атлантической воды, T,S-ансамбли, кластеры, определение средних T,S-значений водных масс.

Для исследования межгодовой изменчивости термохалинной структуры Атлантической воды (АВ), которая поступает в Евразийский бассейн Арктики через пролив Фрама (Фрамовская ветвь АВ, ФВАВ) и желоб Святой Анны (Баренцева ветвь АВ, БВАВ), были применены методы кластерного анализа. Для анализа использовались CTD-данные зондирований вод Евразийского бассейна, выполненных в рамках программы NABOS (Nansen and Amundsen Basins Observing System), полученные в летне-осенний период в различные годы вдоль 126° в.д. и в зоне, перпендикулярной склону между 101° в.д. и 112° в.д.

Для расчетов применялся наиболее популярный метод кластеризации, а именно метод k-средних. Определения кластеров проводились для рядов потенциальной температуры, θ (°C), солёности, S (psu), потенциальной плотности, σ (кг/м³). Потенциальная температура и потенциальная плотность рассчитывались от нулевого горизонта. Диапазон глубин CTD-данных составлял 200 м – Н, где Н – максимальная глубина зондирования. CTD-значения температуры, солёности, потенциальной плотности, для которых определялись кластеры, сводились к безразмерным значениям благодаря нормировке: $\theta' = \theta / (1 \text{ } ^\circ\text{C})$, $S' = S / (1 \text{ psu})$, $\sigma' = \sigma / (1 \text{ кг/м}^3)$.

Рассматривались два варианта разбиения на кластеры: 1) каждая точка на θ, S -диаграмме характеризуется только температурой и солёностью; 2) каждая точка ансамбля зависит от температуры, солёности и потенциальной плотности.

На первом этапе анализа было предпринято разделение θ, S -ансамблей на два и три кластера с учетом нормировки, указанной выше. Разделение на два кластера мотивировалось тем, что АВ после слияния ФВАВ и БВАВ включает в себя две различные водные массы (см., например, [1, 2, 3]). Разделение на три кластера также целесообразно, если предположить, что между различными водными массами существует перемешивание. Обоснованием корректности обработки CTD-данных и метода построения кластеров на данном этапе явился тот факт, что выделенные в θ, S -ансамблях кластеры удовлетворительно соответствовали определениям ФВАВ и БВАВ [1, 2, 3, 4]. Для каждого кластера вычислялись термохалинные характеристики центроидов (центров кластеров), которые соответствовали одновременно средним значениям температуры, солёности и потенциальной плотности ФВАВ и БВАВ.

На втором этапе проводилась аналогичная процедура определения кластеров, но для θ, S, σ -ансамблей. Сравнение результатов показало, что значения температуры и солёности центроидов практически не изменились. Однако анализ трехмерных рядов (θ, S, σ -рядов) позволил определить средние значения одновременно температуры, солёности и плотности водной массы, выделенной кластером. Это дало возможность оценить изменения средней плотности водных масс в различные годы наблюдения.

Таким образом, математический подход к выделению в θ, S -ансамблях и θ, S, σ -ансамблях ФВАВ и БВАВ позволил получить надежные оценки средних термохалинных характеристик этих вод в различные годы. Данный метод, по мнению авторов, является новым и перспективным для изучения климатической изменчивости средних характеристик двух ветвей АВ. Так, в частности, рассчитанные в работе средние термохалинные характеристики АВ свидетельствовали о сильном

потеплении и осолонении АВ в 2006–2008 гг. Этот вывод подтверждает и дополняет результаты [5], полученные на основе оценивания изменчивости максимальной температуры АВ. Также полученный результат уточняет выводы [4] о потеплении и осолонении АВ, которые были сделаны на основе анализа изменения со временем максимальной температуры АВ и соответствующей этой температуре солености.

Работа поддерживалась бюджетным финансированием Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (тема FMWE-2021-0001).

Список литературы

- 1) Schauer U., Loeng H., Rudels B. et al. Atlantic Water flow through the Barents and Kara Seas // Deep-Sea Research I. 2002. № 49(12). P. 2281–2298. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(02\)00125-5](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(02)00125-5)
- 2) Schauer U., Rudels B., Jones E.P. et al. Confluence and redistribution of Atlantic water in the Nansen, Amundsen and Makarov basins // Ann. Geophys. 2002. № 20. P. 257–273. <https://doi.org/10.5194/angeo-20-257-2002>
- 3) Dmitrenko I.A., Rudels B., Kirillov S.A. et al. Atlantic Water flow into the Arctic Ocean through the St. Anna Trough in the northern Kara Sea // J. Geophys. Res.: Oceans. 2015. № 120(7). P. 5158–5178. <https://doi.org/10.1002/2015JC010804>
- 4) Zhurbas N., Kuzmina N. Variability of the thermohaline structure and transport of Atlantic water in the Arctic Ocean based on NABOS (Nansen and Amundsen Basins Observing System) hydrography data // Ocean Sci. 2020. № 16. P. 405–421. <https://doi.org/10.5194/os-16-405-2020>
- 5) Polyakov I.V., Alexeev V.A., Ashik I.M. et al. Fate of Early 2000s Arctic Warm Water Pulse // Bulletin of the American Meteorological Society. 2011. № 92(5). P. 561–566. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2921.1>

ЛАГРАНЖЕВЫЙ МЕТОД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АГУЛЬЯСОВА ПЕРЕНОСА В РАЙОНЕ СМЕШЕНИЯ ВОД

Мальшева А.А.¹, Белоненко Т.В.¹, Будянский М.В.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Тихоокеанский океанологический институт РАН, Владивосток, Россия

Ключевые слова: Агульясов перенос, Капский бассейн, Течение Агульяс, Южно-Атлантический круговорот, Бенгельское течение, AMEDA, лагранжесв анализ.

В данной работе мы изучаем область образования Агульясова переноса [1]. Эта область ограничена 20° - 46° ю.ш., 0° - 20° в.д., включая Капский бассейн. Этот район характеризуется высокой динамической активностью мезомасштабных вихрей и изменчивостью гидрологических параметров в широком диапазоне пространственных и временных масштабов [2]. Главный элемент крупномасштабной циркуляции представлен явлением, называемым Агульясов перенос, на которое влияют Южно-Атлантический круговорот, Бенгельское течение и Бенгельский апвеллинг. Частицы воды различного происхождения смешиваются и влияют на термохалинные свойства мезомасштабных вихрей, образующих Агульясов перенос.

Мы разделили область на три района и показали, что вихри и их свойства различаются в каждом из районов. Агульясов перенос формируется только долгоживущими вихрями, в основном антициклонами, циклоны же имеют меньшие траектории и меньшую продолжительность жизни. В этом исследовании мы применяем статистический анализ с использованием AMEDA, лагранжесв анализ и анализ вертикальных термохалинных разрезов.

Установлено, что в Капской котловине воды Агульяса смешиваются с водами Южно-Атлантического круговорота и Бенгельского течения, а термохалинные свойства вихрей Агульяса меняются, так как теплые и соленые воды Индийского океана смешиваются с более свежими и холодными водами. Воды Южно-Атлантического круговорота пересекают западную границу региона и перемещаются на расстояние более 500 км в восточном направлении, смешиваясь с другими водами.

Мы показываем, что вихри, генерируемые в Капской котловине, также находятся под значительным влиянием вод Южно-Атлантического круговорота. Это воды, поступающие в район Капской котловины с запада и юго-запада. Это объясняет существование двухрежимной структуры воды, отмеченной другими исследователями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект РНФ 22-27-00004).

Список литературы

- 1) Мальшева А.А., Кубряков А.А., Колдунов А.В., Белоненко Т.В. Оценка Агульясова переноса по данным спутниковой альтиметрии и буев Арго // Исследования Земли из космоса. 2020. № 2. С. 24–34.
- 2) Gnevyshev V.G., Malysheva A.A., Belonenko T.V., Koldunov A.V. On Agulhas eddies and Rossby waves travelling by forcing effects // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. Vol. 21. ES5003.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУИЗОЛИРОВАННЫХ ПРИЛИВНЫХ АКВАТОРИЙ БЕЛОГО МОРЯ (С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ АЭРОФОТОСЪЕМКИ)

Маховиков А.Д., Смагин Р.Е.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: аэрофотосъёмка, полуизолированные акватории, Белое море.

Одной из особенностей Кандалакшского залива Белого моря является сильно изрезанная береговая линия, вследствие чего в данном районе имеется большое количество островов и проливов между ними. Здесь же ярко выражены приливно-отливные явления, за счёт которых колебания уровня моря достигают 2 м. По берегам как материковой части, так и островов, насчитывается множество небольших мелководных заливов, осушающихся при отливе. В XXI веке такие заливы стали активно изучаться в Белом море, так как они являются начальной стадией отделения части морской акватории и перехода её к изолированному водоёму. Такое отделение происходит вследствие общего поднятия Фенноскандии, в пределах которой располагается Кандалакшский берег и залив Белого моря. По данным на 1996г. поднятие идёт со скоростью 2-3 мм/г [1], а по данным на 2003г. – до 6-7 мм/г [2]. Во время перехода от морского залива к изолированному от моря озеру отчленяющийся водоём становится сначала полуизолированным: он соединяется с морской акваторией во время полных вод на начальных стадиях отделения, а со временем водоём начинает соединяться с морем только во время полной воды сизигийного прилива. Одним из таких объектов можно считать лагуну Колюшковая, расположенную вблизи пролива Сухая Салма (Кандалакшский залив). Данная акватория активно посещается популяцией колюшки трёхиглой *Gasterosteus aculeatus*, которая играет существенную роль в питании прибрежных рыб в летний период и является важной частью морской экосистемы [3].

Исследования летней океанологической структуры в системе лагуна Колюшковая - пролив Сухая Салма ведутся кафедрой океанологии СПбГУ с 2017г. В результате экспериментов был установлено, что заток морских вод в лагуну происходит только во время сизигийных приливов в полную воду. При этом температура и солёность поверхностных вод в лагуне меняются. Цель работы – изучение данной лагуны с помощью современных методов аэрофотосъёмки.

01.08.2022г. для определения высотного положения и точного местоположения береговой линии лагуны Колюшковая была проведена аэрофотосъёмка с помощью БВС «Геоскан-101». Было сделано две съёмки – начало затока морских вод в лагуну и момент малой воды. Данная аэрофотосъёмка (также была снята большая часть острова Средний и акватории Сухой Салмы) выполнена впервые в истории беломорской учебно-научной базы СПбГУ. Время выполнения съёмки было определено на основе данных измерений, выполненных 20.06.2022, благодаря которым удалось установить запаздывание между началом прилива и началом подъёма уровня вод в лагуне. Изначально планировалось провести съёмку полной воды (момент максимального уровня воды в лагуне), но из-за погодных условий данная съёмка не состоялась, поэтому можно считать, что цель достигнута, но частично. Благодаря получившимся снимкам можно определить высоты береговой линии и рассчитать площадь зеркала лагуны: момент малой воды – 146207 м², момент затока - 163966 м².

Таким образом, на примере одной полуизолированной акватории были опробованы современные методы аэрофотосъёмки. Благодаря данному опыту появляется возможность изучать другие полуизолированные приливные акватории Кандалакшского залива Белого моря.

Работа выполнена в рамках Инициативного проекта СПбГУ «Проливы Керетского архипелага Белого моря: сезонные особенности водообмена».

Авторы благодарят сотрудников кафедры картографии и геоинформатики С.Горлышеву и Д.Бляхарского за техническую помощь в осуществлении эксперимента.

Список литературы

- 1) Ekman, M. Recent postglacial rebound, gravity change and mantle flow in Fennoscandia / M. Ekman, J. Makinen // Geophysical Journal International. – 2007. – №126 (1). – P. 229-234
- 2) Scherneck, H.-G. Vertical crustal motion observed in the BIFROST project / H.-G. Scherneck, J. M. Johansson, H. Koivula, T. van Dam, J. L. Davis // Journal of Geodynamics. – 2003. – №35. – P.425-441
- 3) Маховиков, А. Д. Особенности гидрологии пролива Сухая Салма Белого моря / А. Д. Маховиков, Р. Е. Смагин, М. В. Иванов // ТРУДЫ III ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития. СПб. – 2019. – С.599-603

ТЕМПЕРАТУРА ПОВЕРХНОСТИ МРАМОРНОГО МОРЯ И ТУРЕЦКИХ ПРОЛИВОВ ПО ДАННЫМ LANDSAT-8/9

Медведева А.В., Станичный С.В., Василенко Н.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь

Ключевые слова: Мраморное море, температура поверхности, Босфорский пролив, Пролив Дарданеллы, Эгейское море, TIRS Landsat-8/9.

Мраморное море находится между Черным и Эгейским морем, с которыми непрерывно взаимодействует через проливы Босфор и Дарданеллы. Различие этих морей по термохалинным характеристикам сформировало в Мраморном море двухслойную систему течений противоположной направленности, что обусловило устойчивую стратификацию вод в Мраморном море с глубиной залегания пикноклина от 20 до 30 м [1, 2]. В толще вод над пикноклином регистрируются сезонные изменения температуры от 7.5°C до 28°C, ниже пикноклина температура вод на протяжении года составляет около 14.6°C [4].

В работе проанализирована температура поверхности Мраморного моря и проливов Босфор и Дарданеллы по оптическим спутниковым данным TIRS Landsat-8 (2013-2022 гг.) и TIRS Landsat-9 (2022 г.), восстановление температуры осуществлялось двухканальным методом [3]. Дополнительно привлекались оптические данные среднего разрешения MODIS Aqua и VIIRS Suomi-NPP и данные о характеристиках ветра NCEP/NOMADS.

Начало прогрева вод Мраморного моря регистрируется в марте-апреле, а максимальный – в августе, когда температура поверхности достигает 28°C. На изображениях нередко в период с апреля-мая по сентябрь выявляется, что температура поверхности в юго-западной части моря выше температуры в северо-восточной, что, преимущественно, связано с поступлением черноморских вод в период развития сезонного термоклина в Черном море.

Апвеллинги на изображениях TIRS Landsat-8/9 обнаруживаются редко, контраст между температурой ядра и окружающими водами не превышает 3-4°C. Формируются мраморноморские апвеллинги в теплое время года (май-сентябрь) на фоне устойчивого вдольберегового ветра (западный вдоль северного побережья и восточный вдоль южного), или сгонного. Единично апвеллинги проявляются в зимний период. Учитывая, что в Мраморном море в зимний сезон подтермоклинные воды теплее надтермоклинных, температура в апвеллинге превышает окружающие воды на 2-3°C.

Босфорская струя, проявляется за счет пониженной температуры с апреля-мая по август-сентябрь, контраст с окружающими водами варьирует от 2 до 10°C и более. Причина проявления связана с сочетанием геоморфологического строения Босфорского пролива (наличие порога в южной части и глубокого входа в северной), особенностями термической структуры вод Черного моря и различием в термохалинной структуре вод Черного и Мраморного морей. Глубины Босфорского пролива в его северной и центральной частях достигают 60-70м. Таким образом, в период развития сезонного термоклина в Черном море, который залегает на глубинах около 15-20м, в Босфорский пролив попадают прогретые надтермоклинные и холодные подтермоклинные воды, в том числе и иногда воды холодного промежуточного слоя с температурой 8°C. Из-за порога в южной части пролива они интенсивно перемешиваются, и черноморские воды меньшей плотности распространяются в поверхностном слое Мраморного моря. Эпизодически в эти же месяцы по ходу течения от Босфорского пролива к проливу Дарданеллы (в восточной части моря) обнаруживается локальное проявление вод той же температуры, что и воды Босфорской струи.

В холодное время года (октябрь-март) воды Босфорской струи могут отличаться по температуре как в положительную, так и в отрицательную сторону от вод Мраморного моря, что зависит от

температуры поверхностных вод в прибрежной зоне юго-западной части Черного моря. При этом обнаружился случай (05.02.2022 г.), когда на выходе из Босфорского пролива температура струи выше температуры и черноморских, и мраморноморских поверхностных вод на 1-2°C. Возможно, эта ситуация демонстрирует интенсивное турбулентное перемешивание разных по плотности вод в течении, при котором к поверхности поднимаются более теплые подтермоклинные мраморноморские воды.

Для пролива Дарданеллы и мраморноморских вод, распространяемых в Эгейском море, наблюдается сезонная изменчивость температуры вод поверхностного течения. Примерно с ноября по март температура поверхностных вод в проливе равна температуре поверхностных вод Мраморного моря и холоднее поверхностных вод Эгейского моря. С марта-апреля до декабря температура вод в Дарданеллах нередко превышает температуру мраморноморских вод, в апреле периодически выявляются случаи, когда температура вод в самом проливе может иметь контрасты до 3-5°C. Иногда с мая по июль юго-западнее узкости Чанаккале выявляются воды с пониженной температурой. Их температурный контраст составляет 1-3°C с водами северо-восточнее узкости Чанаккале, юго-западной части Мраморного моря и водами Эгейского моря, но этот контраст может отсутствовать при сравнении с температурой вод в северо-восточной части Мраморного моря. Проявление охлажденных мраморноморских вод в Эгейском море может быть результатом сочетания недостаточного прогрева вод ниже поверхностного слоя, но выше пикноклина в Мраморном море с усилением турбулентного перемешивания из-за сужения в проливе Дарданеллы (узкости Чанаккале). С июля по сентябрь поле температуры в Эгейском море характеризуется выраженной неоднородностью из-за частых апвеллингов, и температура поступающих мраморноморских вод обычно теплее вод восточного побережья Эгейского моря.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 23-27-00421 «Развитие методов спутникового мониторинга аномальных процессов в морских экосистемах на основе многоспектрального подхода» (температура поверхности Мраморного моря и проливов) и в рамках гос. задания FNNN-2021-0003 (нетипичные случаи по данным TIRS Landsat-8/9).

Список литературы

- 1) Beşiktepe Ş. T. et al. The circulation and hydrography of the Marmara Sea //Progress in Oceanography. – 1994. – Vol. 34. – №. 4. – pp. 285-334
- 2) Ünlüata Ü., Oğuz T., Latif M.A. and E. Özsoy 1990. On the Physical Oceanography of the Turkish Straits In: L.J. Pratt (Ed) The Physical Oceanography of Sea Straits NATO/ASI Series, Kluwer, Dordrecht, 25-60 pp.
- 3) Алескерова А. А., Кубряков А. А., Станичный С. В. Двухканальный метод восстановления температуры поверхности Черного моря по измерениям Landsat-8 //Исследование Земли из космоса. – 2016. – №. 4. – С. 57-64
- 4) Запевалов А. С. Сезонная изменчивость вертикальных распределений температуры и солености в Мраморном море //Метеорология и гидрология. – 2005. – №. 2. – С. 78-84

СТРУКТУРА АБИССАЛЬНОГО ПОТОКА ААДВ В ПРОХОДЕ КЕЙН

Мехова О.С.^{1,2}, Смирнова Д.А.^{1,3}, Кречик В.А.^{1,4}, Фрей Д.И.^{1,5,6}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва

⁴Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

⁵Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

⁶Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Ключевые слова: проход Кейн, Антарктическая донная вода, скорость придонного потока, потенциальная температура, котловина Кабо-Верде, котловина Сьерра-Леоне, термохалинная структура.

Плотная и холодная Антарктическая донная вода (ААДВ, $\theta < 2^\circ\text{C}$) образуется в море Уэдделла и распространяется через Юго-Западную Атлантику в северную и восточную часть океана в придонном слое абиссальных котловин и глубоководных каналов. Эта водная масса является важной частью глобальной термохалинной циркуляции. Из Западной Атлантики в Восточную ААДВ проникает через разломы Срединно-Атлантического хребта [1]. Проход Кейн (9° с.ш.) соединяет котловины Кабо-Верде и Сьерра-Леоне, куда антарктические воды поступают с севера, из разлома Вима (11° с.ш.), и с юга, из экваториальных разломов Романш и Чейн (1° ю.ш.), соответственно [2,3,4]. Проход Кейн — самый глубокий проход между котловинами Сьерра-Леоне на юге и Кабо-Верде на севере в восточной части тропической Атлантики. Его седловина асимметрична: более крутой северо-западный склон и более пологий юго-восточный. При этом канал является барьером, через который не проходят максимально холодные донные воды смежных котловин. Особенность прохода Кейн заключается в периодической смене структуры и направления течений в зависимости от объемов переноса через указанные разломы [2]. Настоящая работа посвящена исследованию изменчивости потока ААДВ в этом проходе на основе анализа натуральных данных пространственной структуры и временной изменчивости потоков.

Исследование распределения гидрофизических характеристик в проходе Кейн и в абиссальных котловинах Кабо-Верде и Сьерра-Леоне было основано на результатах CTD и LADCP измерений, полученных в экспедициях с 2009 по 2022 гг. Дополнительно в работе были использованы данные по потенциальной температуре из всемирной базы данных World Ocean Database 2018 (WOD-18) и атласа Мирового океана World Ocean Atlas 2018 (WOA-18), а также временные ряды температуры и скорости течений с автономной заякоренной станции, установленной на седловине (9.35° с.ш. 19.33° в.д.) 21 октября 2010 г. и поднятой 18 октября 2011 г [1]. Придонная потенциальная температура по CTD-измерениям на седловине не опускалась ниже 1.83°C , при этом в котловинах она достигала 1.78°C . Таким образом, котловина Сьерра-Леоне наполняется самой холодной водой из разлома Романш, а котловина Кабо-Верде из разлома Вима. Высота слоя ААДВ на седловине не превышает 500 метров. Внутри канала потенциальная температура не поднимается выше 1.95°C ; следовательно, изотерма 2°C , ограничивающая слой ААДВ, проходит выше его стенок.

Распределение потенциальной температуры на разрезах, выполненных вдоль прохода Кейн в 2019 и 2022 гг., показывает, что слой донной воды с температурой ниже 1.85°C больше по высоте с южного края прохода. Это объясняется тем, что в котловину Сьерра-Леоне вода поступает из разлома Романш, в котором вода имеет более низкую потенциальную температуру по сравнению с разломом Вима.

Данные, полученные в процессе CTD/LADCP-зондирований в 2009, 2010, 2011, 2012, 2022 гг., позволили проанализировать сложную пространственную структуру течений. Направление потока ААДВ менялось в разные годы. Также были зафиксированы разнонаправленные течения в

разных частях прохода. Наибольшие скорости течений наблюдались внутри стенок канала; значения скорости достигали 8-12 см/с на северо-запад и 5-8 см/с на юго-восток. По данным с датчиков заякоренной станции, придонная температура в течение года менялась в зависимости от направления течения. При поступлении ААДВ из котловины Кабо-Верде в придонном слое значения потенциальной температуры у дна выше, чем при противоположно направленном течении.

Временные ряды потенциальной температуры и скорости были построены по данным заякоренной автономной станции. Датчики были установлены на горизонтах 4352, 4477, 4561 м. Измерения показали, что самые высокие значения скорости наблюдались ближе ко дну (до 22 см/с при движении потока на северо-запад и до 20 см/с при движении на юго-восток, но в основном, не превышая 10 см/с независимо от направления). Колебания температуры за весь период измерений на нижнем горизонте составляли 0.05°C. На остальных горизонтах изменения температуры превышали 0.08°C. Также можно отметить, что при продолжительном затоке вод из котловины Сьерра-Леоне происходит понижение температуры на всех горизонтах измерений.

На основании полученных данных можно говорить о том, что проход Кейн является барьером для прохождения холодных придонных вод из котловин Кабо-Верде и Сьерра-Леоне. Поток донной воды в проходе имеет неоднородную пространственную структуру и периодически меняет направление. Величина придонной температуры в канале зависит от направления затока и его продолжительности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 21-77-20004.

Список литературы

- 1) van Haren H. et al. Convective and shear-induced turbulence in the deep Kane Gap //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2013. – Т. 118. – №. 11. – С. 5924-5930. doi:10.1002/2013JC009282
- 2) Morozov E. G., Tarakanov R. Y., Frey D. I. Bottom Gravity Currents and Overflows in Deep Channels of the Atlantic Ocean Observations, Analysis, and Modeling. – Springer Nature, 2021.
- 3) Frey D. I. et al. Regional modeling of Antarctic bottom water flows in the key passages of the Atlantic //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2019. – Т. 124. – №. 11. – С. 8414-8428. <http://doi.org/10.1029/2019JC015315>
- 4) Morozov E. G., Tarakanov R. Y., Van Haren H. Transport of Antarctic bottom water through the Kane Gap, tropical NE Atlantic Ocean //Ocean Science. – 2013. – Т. 9. – №. 5. – С. 825-835. Doi: 10.5194/os-9-825-2013

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОВЫХ ВОЛН В МОРЯХ ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Мысленков С.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: ветровые волны, моделирование волнения, море Лаптевых, Чукотское море, Восточно-Сибирское море.

В последние годы происходит динамичное развитие Северного морского пути, что связано в основном с уменьшением площади льдов в Арктике. Увеличение площади открытой воды и длительности безледного периода делает актуальными задачи, связанные с современным волновым климатом арктических морей. Некоторые современные результаты моделирования ветрового волнения в море Лаптевых, Чукотском и Восточно-Сибирском морях приведены в работах [1,2]. Но в связи с сильно меняющимся климатом моделирование волнения необходимо проводить с учетом данных последних лет. В данной работе представлены результаты расчетов ветрового волнения за период с 1979 по 2021 год в море Лаптевых, Чукотском и Восточно-Сибирском морях. Оценка качества проводилась на основе данных заякоренных датчиков и спутниковых данных. В результате получены оценки режимных и экстремальных характеристики ветрового волнения, а также трендов основных параметров. Для расчета параметров ветрового волнения в море Лаптевых, Чукотском и Восточно-Сибирском морях использовалась спектральная волновая модель третьего поколения WAVEWATCH III версии 6.07. Для генерации волн использована схема ST6, для расчета нелинейных взаимодействий схема DIA, для учета влияния льда схема IC0. Для учета воздействия придонного трения используется схема JONSWAP. Спектральное разрешение модели составляет 36 направлений ($= 10^\circ$), частотный диапазон – 36 интервалов от 0.03 до 0.843 Гц. Общий шаг по времени для интегрирования полного уравнения волнового баланса составляет 15 минут, шаг по времени для интегрирования функций источников и стоков волновой энергии составляет 60 секунд, шаг по времени для передачи энергии по спектру составляет 450 секунд. При моделировании волнения использовались данные о ветре и концентрации льда с шагом по времени 1 час из реанализа NCEP/CFSR (1979-2010) с пространственным разрешением 0.3° и реанализа NCEP/CFSv2 (2011-2021) с разрешением 0.2° . Вычисления проводились на неструктурной триангуляционной сетке, состоящей из 36176 узлов. Данная сетка покрывает акваторию моря Лаптевых, Чукотского и Восточно-Сибирского морей, а также часть Северного Ледовитого океана. Для прибрежной зоны исследуемых морей шаг сетки составляет около 800 м, а в открытой части около 10-15 км. Подобные триангуляционные сетки успешно применялись ранее для Охотского и Баренцева морей [3,4, 5]. Для оценки качества результатов моделирования было произведено сравнение результатов моделирования с данными наблюдений за волнением, выполненных в 2012 году на станции NDBC №48213 (71.502 N 164.133 W). Коэффициент корреляции составил 0.95, систематическая ошибка -0.05 м, среднеквадратическая ошибка 0.27 м, коэффициент рассеяния 0.16. Также оценка качества проведена на основании данных спутника CFOSAT. Сравнение проведено для периода июль-декабрь 2019 года, выборка составила более 82000 значений для всей области моделирования. Коэффициент корреляции составил 0.88, систематическая ошибка -0.07 м, среднеквадратическая ошибка 0.35 м, коэффициент рассеяния 0.27. В результате проведенных расчетов для каждого узла вычислительной сетки получены характеристики ветрового волнения за каждые 3 часа с 1979 по 2021 гг. (всего 43 года). Далее для каждого узла сетки вычислялась средняя высота значительных волн (в те периоды, когда присутствует лед высота волны считалась как 0 и учитывалась при вычислении среднего), максимальная высота значительных волн и 95-й перцентиль. Такие же статистические параметры вычислялись для периода (T01) и средней

длины волны. В море Лаптевых средняя высота волн составляет около 0.1–0.3 м. В Восточно-Сибирском море средняя высота волн около 0.1–0.2 м. В Чукотском море средняя высота волн от 0.2 до 0.7 м. Более высокие средние значения на юге Чукотского моря наблюдаются из-за более мягких ледовых условий по сравнению с другими морями. В море Лаптевых максимальная высота волн составляет около 5–6 м. В Восточно-Сибирском море максимальная высота волн 6–7 м. В Чукотском море максимальная высота волн 7–7.5 м. Для оценки межгодовой изменчивости в каждом море была выбрана точка для анализа. В каждой из точек выполнен анализ среднегодовой высоты значительных волн, а также анализ средней высоты волн для безледного периода. Для всех морей наблюдаются положительные тренды и для среднегодовых значений высоты волн и для средних в безледный период. Наиболее сильный тренд выявлен в Восточно-Сибирском море для средних значений в безледный период (от 0.4 м в 1979 году до 1.2 м в 2021). Для моря Лаптевых и Чукотского моря тренды на увеличение высоты волн слабые. В будущем предполагается перейти к прогнозу параметров ветровых волн в восточном секторе российской Арктики по аналогии с системой прогноза для Черного моря [6].

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 23-27-00239).

Список литературы

- 1) Плотников В.В., Вражкин А.Н., Мезенцева Л.И., Друзь Н.И., Вакульская Н.М., Дубина В.А. Изменчивость гидрометеорологического режима морей восточного сектора Арктики (Восточно-сибирское, Чукотское) в современный период // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 7. С. 103–115
- 2) Sharmar V., Markina M. Evaluation of interdecadal trends in sea ice, surface winds and ocean waves in the Arctic in 1980-2019 // Russian Journal of Earth Sciences. 2021. Vol. 21. No 2. P. ES2002
- 3) Иванова А.А., Архипкин В.С., Мысленков С.А., Шевченко Г.В. Моделирование штормовых нагонов в прибрежной зоне о. Сахалин // Вестник Московского университета, Серия 5: География. 2015. № 3. С. 41-49
- 4) Мысленков С.А., Архипкин В.С., Колтерманн К.П. Оценка высоты волн зыби в Баренцевом и Белом морях // Вестник Московского университета, Серия 5: География. 2015. № 5. С. 59-66
- 5) Мысленков С. А., Маркина М. Ю., Архипкин В. С., Тилинина Н. Д. Повторяемость штормового волнения в Баренцевом море в условиях современного климата // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2019. № 2. С. 45-54
- 6) Мысленков С.А., Столярова Е.В., Архипкин В.С. Система прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2017. № 44. С. 126-135

ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ БЛОКИНГОВ НАД КАСПИЙСКИМ МОРЕМ ЗИМОЙ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА ERA 5

Наурызбаева Ж.К.¹, Холопцев А.В.²

¹Казахский Национальный университет имени Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова», г. Севастополь, Россия

Ключевые слова: Каспийское море, атмосферные блокинги, реанализ, толщина льда, ледовый режим.

Оценены повторяемости атмосферных блокингов зимой 2010-2020 гг., изучено их влияние на ледовый покров Северного Каспия. Использована представленная в реанализе ERA5 [1-2] информация об атмосферном давлении, приведенные к уровню моря, значения геопотенциала 850, 500, 300 гПа, данные гидрометеорологических станций Прикаспия. Установлено, что при блокингах, температуры воздуха ниже, чем в период их отсутствия; в Прикаспийском регионе имеет место значимая связь между уменьшением повторяемости блокингов, сумм отрицательных температур воздуха и толщиной льда.

Целью работы является оценка значений повторяемости атмосферных блокингов (АБ) продолжительностью более 5 суток и изменений их термического режима.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

- оценка за 2010-2020 гг. значений повторяемости АБ продолжительностью более 5 суток;
- выявление изменений термического режима, которые возникают зимой при АБ;
- выявление особенностей этих изменений, происходящих в Прикаспийском регионе.

Результаты проведенного исследования соответствуют существующим представлениям о влиянии АБ на метеоусловия в континентальных регионах Северного Умеренного климатического пояса [3-6].

В Прикаспийском регионе имеет место значимая связь между уменьшением продолжительными блокингами, сумм модулей отрицательных температур воздуха на его побережьях и толщиной ледяного покрова соответствующих участков прибрежных акваторий. Чем больше суммарная длительность АБ за предыдущие зимние месяцы, тем температурный фон в регионе ниже, а толщины льда в феврале больше.

Установлено, что в современном периоде преобладает тенденция к уменьшению повторяемости АБ продолжительностью более 10 суток, которые могут возникать в зимние месяцы, что может служить существенной причиной быстрого потепления его климата. В суровые зимы суммы отрицательных температур на побережья Северного Каспия в периоды АБ могут достигать (и даже превышать) 70–90 градусов, что благоприятствует быстрому увеличению толщины ледяного покрова его акватории. Эти процессы могут быть наиболее опасны в ноябре-декабре, когда они способны приводить к образованию такой разновидности льда, как «резун», опасного для лодок и маломерных судов.

В мягкие (теплые) зимы повторяемость АБ заметно меньше, чем в суровые, а суммы отрицательных температур воздуха в регионе по модулю значительно меньше. При этом ледяной покров Северного Каспия имеет незначительные толщины льда.

Список литературы

- 1) Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., and Thépaut, J.-N. The ERA5 global reanalysis, Quarterly

Journal of the Royal Meteorological Society, 146. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>, 2020

- 2) Hoffmann L., Günther G., Li D., Stein O. et al. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations // *Atm. Chem. Phys.* 2019. Vol. 19. P. 3097-3124
- 3) Мохов И. И., Акперов М. Г., Прокофьева М. А., Тимажев А.В., Лупо А.Р., Ле Трет Э. Блокинги в северном полушарии и евроатлантическом регионе: оценки изменений по данным реанализа и модельным расчетам // *доклады академии наук*, Т. 449. № 5. 2013. С. 1–5
- 4) Bacer S., Jomaa F., Beaumet J., Gallée H., Le Bouëdec E., Ménégoz M., Staquet C. Impact of climate change on wintertime European atmospheric blocking // *Weather and Climate Dynamics*, 2021. <https://doi.org/10.5194/wcd-2021-47>
- 5) Barriopedro D., García-Herrera R., Lupo A. R., Hernández E. A Climatology of Northern Hemisphere Blocking, *Journal of Climate*, 19, 2006. P. 1042–1063 <https://doi.org/10.1175/JCLI3678.1>
- 6) Kononova N. K., Lupo A. R. Changes in the Dynamics of the Northern Hemisphere Atmospheric Circulation and the Relationship to Surface Temperature in the 20th and 21st Centuries// *Atmosphere*. – 2020. 11(3). 255; <https://doi.org/10.3390/atmos11030255>

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВЯЙСЯЛЯ-БРЕНТА В ЦИКЛОНАХ И АНТИЦИКЛОНАХ НА ПРИМЕРЕ ЛОФОТЕНСКОЙ КОТЛОВИНЫ

Новоселова Е.В.¹, Белоненко Т.В.¹, Жмур В.В.^{2,3}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

²Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва

³Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

Ключевые слова: Частота Вьяйсяля-Брента, Лофотенская котловина, Лофотенский вихрь, Норвежское море, стратификация, GLORYS12V1.

Лофотенская котловина Норвежского моря играет важную роль в поддержании глобальной Меридиональной термохалинной циркуляции в области: здесь атлантические водные массы, следующие в Арктику, отдают тепло в атмосферу, перемешиваются с окружающими водами и претерпевают трансформацию, необходимую для образования глубинных вод. В данной работе исследуются изменения частоты Вьяйсяля-Брента, вызванные мезомасштабными вихрями различной полярности. Рассматриваются два вихря: квазипостоянный антициклон – Лофотенский вихрь, расположенный в центре котловины, и циклон, расположенный юго-восточнее ЛВ. Вычисляются характеристики вихрей, исследуются профили и вертикальные разрезы частоты Вьяйсяля-Брента. Для анализа используются данные океанического реанализа GLORYS12V1.

Растяжение или сжатие по вертикали элементарных жидких объемов приводит к изменениям частоты Вьяйсяля-Брента. Она возрастает при усилении стратификации морской воды и уменьшается в слабостратифицированных водах. Наличие вихрей приводит к деформации и смещению изопикн, которые в покоящемся океане при отсутствии вихрей представляют собой горизонтальные поверхности, причем наиболее сильной деформации будут подвергаться те части изопикнических поверхностей, которые попали внутрь вихревого ядра или находятся вблизи него. Было показано, что изопикны в циклонах и антициклонах деформируются в среднем в противоположных направлениях. Циклонические вихри сближают изопикны, втягивая ближние внешние изопикны внутрь вихревого ядра, в то же время антициклонические вихри раздвигают изопикны друг от друга. Последнее приводит к увеличению частоты ВБ в вихревом ядре циклона и соответствующему ее уменьшению в антициклоне. Показано, что аномалии частоты ВБ относительно фоновой частоты положительны в ядре циклона и отрицательны в ядре антициклона [1-2].

Публикация выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГУ № 94033410.

Список литературы

- 1) Zhmur V. V., Novoselova E. V., Belonenko T. V. Peculiarities of Formation the of Density Field in Mesoscale Eddies of the Lofoten Basin: Part 1 // Oceanology. 2021. 61(6). 830–838. DOI: 10.1134/S0001437021060333
- 2) Жмур В. В., Белоненко Т. В., Новоселова Е. В. Особенности формирования поля плотности в мезомасштабных вихрях Лофотенской котловины. Часть 2 // Океанология. 2022. 62(3). 341–356. DOI: 10.31857/S0030157422030170

ЦУНАМИ ЧЕРНОГО МОРЯ (1927, 1939, 1966 ГОДОВ)

Онищенко Н.А.¹, Медведева А.Ю.^{1,2}, Медведев И.П.², Архипкин В.С.¹

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

²Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: физика океана, цунами, моделирование, Черное море.

Возникающие в Черном море цунами в целом изучены слабо. Несмотря на небольшие размеры, они могут приводить к катастрофическим последствиям. Следы разрушительных цунами видны на берегах современной Грузии и Болгарии.

Была выполнена палеорекострукция местоположения источников землетрясения, произведен расчет высот волн цунами (с использованием технологии вложенных сеток сравнение с данными мареографов (архив МГИ). Использовались модели TUNAMI (модификация И.В. Файна), OKADA (1985). Был проведен анализ Ялтинского (1927 г.), Эрзинджанского (1939 г.) и Анапского (1966 г.) землетрясений.

Ялтинское землетрясение (11.09.1927), магнитуда 6.7.

Первая волна ялтинского цунами пришла в положительной фазе (данные моделирования совпадают с данными мареографа). При общей схожести периодов волн, некоторые параметры высот, полученные при моделировании, больше, чем натурные данные. Вероятным объяснением служит совокупность причин: особенности строения трубы мареографа и неправильно установленный барабан, обрезающий ленту сверху, близкое взаиморасположение эпицентра землетрясения и мареографа.

Эрзинджанское землетрясение (26.12.1939), магнитуда 7.8.

Гипоцентр находился на глубине около 15 км. Моделирование и анализ цунами осложняются положением эпицентра, расположенного на суше.

Анапское землетрясение (12.07.1966), магнитуда 5.8.

Гипоцентр располагался на глубине примерно 50 км. Из-за малой магнитуды большую сложность представляет собой построение модели сейсмического источника.

Выводы:

1) Черное море является цунамиопасной акваторией. Наибольшую опасность представляют землетрясения с очагами вблизи Кавказского и Крымского побережий моря. Основные факторы: малое время добегаания волн, высокая магнитуда землетрясений, хорошо развитая прибрежная инфраструктура.

2) Анализ мареографических данных Ялтинского землетрясения показал, что величины высот волн цунами сильно занижены по техническим причинам.

3) Для событий 1939 г. и 1966 г. численная модель занижает высоту волн цунами, вызванных землетрясением.

Список литературы

- 1) Григораш З.К. Распространение цунами 1927 г. в Черном море // Труды морского гидрофизического ин-та, том XVIII. Теория волн и течений. М: изд-во АН СССР, 1959.-171 с.
- 2) Григораш З.К., Корнева Л.А. Волны цунами, сопровождавшие Анапское землетрясение 12 июля 1966 г. // Океанология. – 1969 – Т. 9. – Вып. 6.
- 3) Григораш З.К., Корнева Л.А. Мареографические данные о цунами в Черном море при турецком землетрясении в декабре 1939 г. // Океанология. – 1972. – Т. 12. – Вып. 3.

- 4) Никонов А. А., Гусяков В. К., Флейфель Л. Д. Новый каталог цунами в Черном и Азовском морях в приложении к оценке цунамиопасности Российского побережья //Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – №. 2. – С. 240-255
- 5) Papadopoulos G. A. et al. Tsunami hazard in the Black Sea and the Azov Sea: a new tsunami catalogue //Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2011. – Т. 11. – №. 3. – С. 945-963

ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СУБАНТАРКТИЧЕСКОГО ФРОНТА В ПРОЛИВЕ ДРЕЙКА

Остроумова С.А.^{1,2}, Дрозд И.Д.^{1,3,4}, Фрей Д.И.^{1,5,6}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва,

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва,

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва,

⁵Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь,

⁶Московский физико-технический институт, Долгопрудный.

Ключевые слова: Субантарктический фронт, спутниковая альтиметрия, Антарктическое циркумполярное течение, пролив Дрейка.

Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ), опоясывающее Антарктиду, играет важную роль в крупномасштабной циркуляции океана и формировании климата планеты. В зонах сильных градиентов температуры, солености и уровня моря образуются геострофические течения. Согласно классификации [1] в АЦТ выделяется 9 струй: северная, главная и южная ветви субантарктического (САФ) и полярного фронтов, северная и южная ветви южного фронта АЦТ, а также южная граница АЦТ. Авторы работы [2] используют подобное разделение струй, однако не выделяют южную ветвь САФ. Эта классификация основана на методе определения положения фронтов по фиксированным изолиниям абсолютной динамической топографии (АДТ). Спутниковая альтиметрия помогает исследовать временную и пространственную изменчивость циркуляции океана. Однако подобные массивы данных могут сглаживать положение фронта и скорость течения, особенно при усреднении по времени, и не дают достаточного разрешения для определения сравнительно узких и быстро меняющихся фронтов.

В данной работе рассматривается вертикальная структура САФ в северной части пролива Дрейка на основе судовых измерений, а также пространственно-временная изменчивость по данным вдольтрековой спутниковой альтиметрии. Для анализа распределения гидрофизических параметров использовались натурные данные, полученные в 79-ом рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» 6-го февраля 2020 года. Скорости течений в верхнем слое океана измерялись SADCР Ocean Surveyor фирмы TRDI частотой 76.8 кГц; ранее эти данные использовались для исследования вертикальной структуры обеих ветвей САФ и ее эволюции вдоль континентального склона [3]. Исследование термохалинной структуры фронта основано на 11 станциях, выполненных STD-зондом SBE 19plus SEACAT фирмы SeaBird. Вдольтрековые спутниковые данные с 1993 по 2020 гг. взяты с ресурса Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS, <http://marine.copernicus.eu/>, дата обращения 29.11.2021) из массива данных SEALEVEL_GLO_PHY_L3_MY_008_062 (уровень обработки L3), содержащего данные аномалий уровня моря. Временное разрешение спутниковых измерений составляет 9 дней 21 час 58 минут, пространственное — 6.2 км вдоль трека. Для анализа временной изменчивости САФ выбран трек №28, ближайший к разрезу с натурными измерениями, ориентированный параллельно треку судна и находящийся на расстоянии около 45 км от разреза.

По данным судовых измерений северная ветвь САФ (САФ-с) с максимальными скоростями в ядре течения до 50 см/с наблюдалась над изобатой 300 м. Ядро главной ветви САФ (САФ-гл), которая находилась на расстоянии 280 км от изобаты 300 м, были отмечены максимальные скорости течения 59 см/с. Северная ветвь, определенная на основе фиксированных уровней АДТ, находится на расстоянии 60 км от кромки шельфа. При этом максимальный градиент АДТ зафиксирован в 8 км от изобаты 300 м. Это говорит о том, что точность определения положения фронтов повышается при их выделении по максимальным градиентам уровня моря. В результате анализа данных

вдольтрековой спутниковой альтиметрии за 28 лет обнаружен значимый тренд повышения АДТ со скоростью 4 мм/год в точках максимума градиента САФ-с, для САФ-гл этот тренд составил 2.5 мм/год. Полученные оценки тренда согласуются со средними значениями повышения уровня Мирового океана (2.94 ± 0.05 мм/год) [4]. Анализ данных показал смещение уровней АДТ, относящихся к САФ, на 1.5-1.6 км/год от кромки шельфа в юго-восточном направлении. Зависимость пространственной изменчивости фронтов от времени года не наблюдались.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при определении местоположений фронтов важно принимать во внимание многолетнюю изменчивость уровня моря. Проведенное исследование показало, что привязка фронтов к определенным постоянным изолиниям АДТ со временем теряет свою актуальность. Расхождение в определении положения фронта, выполненном по фиксированным изолиниям АДТ, может достигать 50 км и более, что безусловно является важным фактором при оценке состояния Южного океана и происходящих в этом районе климатических изменений.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 22-77-10004.

Список литературы

- 1) Sokolov S., Rintoul S.R. Circumpolar structure and distribution of the Antarctic Circumpolar Current fronts: 1. Mean circumpolar paths // *Journal of Geophysical Research: Oceans* № 114(C11). 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JC005108>
- 2) Barré N., Provost, C., Renault, A., et al. Fronts, meanders and eddies in Drake Passage during the ANT-XXIII/3 cruise in January–February 2006: A satellite perspective // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* № 58(25-26). 2011. С. 2533-2554 <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2011.01.003>
- 3) Frey, D.I., Piola, A.R., Krechik, V.A., et al. Direct measurements of the Malvinas Current velocity structure // *Journal Geophysical Research* № 126 (e2020JC016727). 2021. <https://doi.org/10.1029/2020JC016727>
- 4) Fang M., Zhang J. Basin-scale features of global sea level trends revealed by altimeter data from 1993 to 2013 // *Journal of Oceanography* № 71(3). 2015. С. 297-310 <https://doi.org/10.1007/s10872-015-0289-1>

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ ЛЕНГМЮРА НА ПРИПОВЕРХНОСТНУЮ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Павлов М.И., Чухарев А.М.

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: Циркуляции Ленгмюра, приповерхностный слой, механизмы генерации турбулентности.

Приповерхностная турбулентность влияет на многие физические процессы в море: газообмен, распространение взвесей и биогенных веществ, вертикальное перемешивание. Недостаточная изученность физических процессов в этом слое моря приводит к тому, что расчеты по прогностическим моделям для верхнего слоя могут сильно отличаться от реально наблюдаемых величин. Достаточно много внимания сейчас уделяют циркуляциям Ленгмюра (ЦЛ). Крупные когерентные структуры, возникающие под воздействием ветра и дрейфа Стокса, создают неустойчивость, которая приводит к более интенсивному турбулентному обмену. По мнению ряда исследователей, [1 – 3], включение этого механизма перемешивания в крупномасштабные модели взаимодействия океана и атмосферы поможет существенно улучшить объективность теоретических расчетов.

По проведенным исследованиям, проводившихся в 2020–2021 гг. на гидрофизическом подспутниковом полигоне МГИ РАН сотрудниками отдела турбулентности получены данные об основных динамических характеристиках в наблюдавшихся ЦЛ. Платформа расположена в море в 600 метрах от берега. Ее максимальная высота составляет 21 метр. Длина и ширина около 25 метров. На высоте 5 метров над уровнем моря смонтирована рабочая палуба, предназначенная для размещения приборов и научного оборудования. Глубина моря в районе установки 26 – 30 м. Основываясь на работах [4 – 5] была разработана методика исследования, заключающаяся в определении нисходящих и восходящих потоков в зонах конвергенции и дивергенции в когерентных структурах Ленгмюра, применяя акустический измеритель скорости течения DVS-6000 (ADCP) расположенный на глубине 5 м ниже поверхности моря. Для оценки интенсивности турбулентных процессов и влияния на вертикальное перемешивание рассчитывается скорость диссипации турбулентной энергии ϵ . Расчет ϵ осуществляется по измеренным пульсационным составляющим трех компонент вектора скорости течения и пульсациям температуры. Измерения турбулентных пульсаций гидрофизических величин проводятся созданным в Морском гидрофизическом институте комплексом «Сигма-1».

Испытана методика определения основных динамических характеристик ЦЛ, к которым относятся: скорость смещения структур перпендикулярно ветру, количество наблюдаемых ячеек за период наблюдения; ширина зон конвергенции и дивергенции (для краткости их называют иногда периодами) и разнонаправленные вертикальные скорости в них (амплитуды). Для статистической оценки рассчитывались коэффициенты взаимной корреляции вертикальной скорости течения в зонах конвергенции и скорости ветра – $B_{W \& V_{10}}$; вертикальной скорости течения и изменение направления ветра – $B_{W \& \Delta \alpha}$.

При анализе динамики когерентных структур были обнаружены следующие особенности:

- Средняя вертикальная скорость W в зонах конвергенции и ширина зон зависит от скорости ветра V_{10} ;
- Скорость смещение структур пропорционально зависит от скорости ветра. Диапазон наблюдавшихся в экспериментах скоростей смещения составлял от 0.007 до 0.014 м/с;
- Самая большая амплитуда зон конвергенции была обнаружена ночью 6 – 66 мм/с, при слабом ветра 1 – 2 м/с. Направление ветра менялось в среднем на 35 градусов каждые 10 мин. Такие амплитудные колебания могут быть связаны с процессами конвекции в ночной период;

– Коэффициенты взаимной корреляции $B_{W\&V10}$, $B_{W\&\Delta a}$ демонстрирует среднюю связь — 0.5 – 0.6 в моменты когда ветер имеет устойчивое направление;

– Интенсивность турбулизации приповерхностного слоя увеличивается с увеличением количества ячеек. Максимальное количество которых формируется при «плавном» изменении направления ветра в диапазоне 10° - 15° в течении 10-20 минут. В среднем наблюдалось около 11 – 13 ячеек в течении 120 – 150 минут.

Исследовав динамику когерентных структур, исходя из полученных характеристик был выявлен режим, при котором наибольшая интенсивность турбулизации от ЦЛ — $\epsilon = 2 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}^3$ возникает при ветре около 5 м/с. Направление ветра должно быть устойчивым, изменение не больше чем на 15° в течение 10 минут, при этом наблюдается наибольшее количество ячеек. Такое влияние ЦЛ на интенсивность турбулентного перемешивания связано с ячейками, которые успевают формироваться и перестраиваться при таком режиме. Турбулентные вихри, которые возникают на поверхности и концентрируются в пузырьковых облаках, в следствии успешно переносятся большим количеством когерентных ячеек.

Работа выполнена в рамках госзадания FNNN-2021-0004 при поддержке гранта РФФИ №22-17-00150.

Список литературы

- 1) Plueddemann J, et al. / Structure and variability of Langmuir circulation during the Surface Waves Processes Program // J. Geophys. Res. Atmospheres · February 1996. V. 101, P. 3525-3543. doi: 10.1029/95JC03282.
- 2) Kukulka T., Plueddemann A. J. and Sullivan P. P. Nonlocal transport due to Langmuir circulation in a coastal ocean // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. doi:10.1029/2012JC008340.
- 3) McWilliams J.C., Huckle E., Liang J.-H., and Sullivan P.P. The wavy Ekman layer: Langmuir circulations, breaking waves and Reynolds stress // J. Phys. Oceanogr., 2012. V. 42. P. 1793–1816. doi: 10.1175/JPO-D-12-07.1
- 4) Weller RA, Price JF. Langmuir circulation within the oceanic mixed layer. // DeepSea Res. 1988. 35:711–47. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90027-1](https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90027-1).
- 5) S.A. Thorpe, Langmuir circulation. // Annual Review of Fluid Mechanics. 2004.Vol. 36:55-79. doi: 10.1146/annurev.fluid.36.052203.071431.

ДИНАМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА БЕНГЕЛЬСКОГО АПВЕЛЛИНГА И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА ТРАНСПОРТ СОЛИ

Павлушин В.А., Кубряков А.А.

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

Ключевые слова: Бенгельский апвеллинг, сезонная изменчивость, спутниковые измерения, межгодовая изменчивость, течения.

Восточные пограничные апвеллинги являются важной частью глобального океанического конвейера, оказывая значительное влияние на вертикальный обмен в Мировом океане. Зоны подъема вод являются важнейшими источниками питательных веществ, способствующих развитию фито- и зоопланктона, которые в свою очередь являются кормовой базой для множества видов рыб [1]. Биогенные вещества, поднятые в верхний слой, далее транспортируются на большие расстояния в центральную часть океана под действием ветровой циркуляции. В связи с этим изменчивость интенсивности восточных апвеллингов оказывает значительное влияние на биопродуктивность вод различных районов Мирового океана [2].

В настоящей работе, на основе спутниковых альтиметрических данных и измерений поверхностной солености, измерений буев Арго и результатов реанализа исследуется динамическая структура вод в районе Бенгельского апвеллинга и её влияние на транспорт соли в Западную Атлантику.

В работе для определения солёности использовались данные, полученные по измерениям прибора SMAP за 2015-2019 год с пространственным разрешением $0,25^\circ$ и временной дискретностью 8 дней. Для определения скоростей течений в работе использовались картированные данные об абсолютной динамической топографии, полученные по комбинированным данным спутниковых альтиметров, как сумма аномалии уровня морской поверхности (SLA) и средней динамической топографии (Mulet et al., 2013). Пространственное разрешение данных – $0,25^\circ$, временная дискретность – 1 сутки (delayed-time product). Для реанализа используется массив Global Ocean Ensemble Reanalysis за 2015 – 2019 года с пространственным разрешением $0,25^\circ$. https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_031/INFORMATION

На основе этих данных была оценена интенсивность фронтального течения на периферии апвеллинга. Среднегодовые оценки скорости этого течения за весь период составили около $5 \text{ см}\backslash\text{с}$, а максимальные и минимальные соответственно $2 \text{ см}\backslash\text{с}$ и $8 \text{ см}\backslash\text{сек}$ [3]. Анализ вертикального распределения скорости течений по данным буев Арго и реанализов показал, что фронтальные течения в ряде районов достигают глубин 1000 м. При этом существует поворот направления течений на глубинах 200-600 м. Скорость течения характеризуется значимой сезонной и межгодовой изменчивостью, которая определяется градиентами плотности. и напрямую связана с интенсификацией апвеллинга [5,6]. На основе сопоставления данных о температуре и скорости течений получены оценки связи скорости течений и термических характеристик апвеллинга.

Проведена оценка поступления опреснённых вод из районов апвеллинга в западную часть Атлантики. Для этого был оценен средний транспорт через меридиональный разрез по центру Атлантического океана, который составил порядка 6000 т/сек. Изменчивость этого транспорта также хорошо коррелирует с интенсивностью Бенгельского апвеллинга с временным лагом порядка 90 дней.

Для анализа влияния вклада вихрей в перенос соли проведена их автоматическая идентификация по данным альтиметров. Для идентификации вихрей был применён метод «winding angle» [4]. Далее, было рассчитано количество вихрей, проходящих через разрез, их скорость смещения и суммарный перенос соли вихрями. Результаты показали, что за 6 лет через разрез прошло

255 вихрей, которые переносили объем соли равный примерно 10^7 тонн. Таким образом, вихревой перенос составляет не более 5% от среднего потока, который в первую очередь, определяется фронтальными течениями на периферии апвеллинга.

Работа выполнена в рамках Госзадания FNNN-2021-0006

Список литературы

- 1) Bograd S. J. et al. Climate change impacts on eastern boundary upwelling systems //Annual Review of Marine Science. – 2023. – Т. 15.
- 2) Hardman-Mountford NJ, Richardson AJ, Agenbag JJ, Hagen E, Nykjaer L, Shillington FA, Villacastin C (2003) Ocean climate of the South East Atlantic observed from satellite data and wind models. Prog Oceanogr 59:181–221.
- 3) Hagen E. et al. Modifications saisonnieres et interannuelles de l'upwelling intense de Benguela //Oceanologica Acta. – 2001. – Т. 6. – №. 24. – С. 557-568.
- 4) Кубряков А. А., Станичный С. В. Синоптические вихри в Черном море по данным спутниковой альтиметрии //Океанология. – 2015. – Т. 55. – №. 1. – С. 65-65.
- 5) Полонский А.Б., Серебренников А.Н. Об изменении температуры поверхности океана в зоне Бенгельского апвеллинга. Часть 1: сезонный цикл // Исследование Земли из космоса. - 2019. - №3. - С. 33-44.
- 6) Полонский А.Б., Серебренников А.Н. Об изменении температуры поверхности океана в зоне бенгельского апвеллинга. Часть 2: многолетние тенденции // Исследование Земли из космоса. - 2019. - №4. - С. 29-39.

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНУТРЕННИХ ВОЛН ПО ФОНОВОЙ СТРАТИФИКАЦИИ И ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ АВАЧИНСКОГО ЗАЛИВА ТИХОГО ОКЕАНА

Пиваев М.Д.¹, Софьина Е.В.^{1,2}, Романенков Д.А.², Зимин А.В.^{2,3}

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

³Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: физика океана, стратификация, прилив, внутренняя волна, фазовая скорость, модовая структура.

На акватории Авачинского залива Тихого океана вклад внутренних волн в изменчивость гидрологии вод слабо изучен, что обусловлено малым набором натуральных измерений и отсутствием высокоразрешающих численных океанологических моделей в регионе. Рельеф дна залива весьма сложен и характеризуется узким шельфом и крутым материковым склоном. Вертикальная стратификация вод относится к тихоокеанскому типу субарктической структуры. Существенное влияние на изменчивость гидрологической структуры вод региона оказывает холодное Восточно-Камчатское течение и связанные с ним вихревые структуры. Другим постоянно действующим фактором влияния являются приливные процессы. Сведения о приливных течениях в районе исследования крайне скудны. Длинные внутренние волны могут возникать преимущественно при периодическом отекании баротропным приливом рельефа дна и вследствие инерционного отклика на атмосферные воздействия.

Цель работы состояла в том, чтобы оценить кинематические характеристики и вертикальную структуру приливных внутренних волн на шельфе и у подножия континентального склона Авачинского залива. Ввиду отсутствия необходимых наблюдений за приливными внутренними волнами, на первом шаге для оценки их характеристик и вертикальной структуры используется метод разложения колебаний на вертикальные моды по фоновой стратификации, описанный в [1]. Численная реализация метода основана на нахождении собственных значений и собственных функций задачи Штурма-Луивилля для колебаний динамических характеристик по вертикали [2,3]. Исходными данными для задачи служили: 1) среднемесячная стратификация по данным реанализа системы Меркатор [4] и 2) эпизодическая стратификация по данным вертикального зондирования во время летней экспедиции СПбФ ИОРАН [5]. Расчеты выполнялись для основной приливной полусуточной гармоники M_2 . Изучался сезонный ход кинематических характеристик (длина волны, фазовая и групповая скорости), а также исследовалась применимость двухслойного приближения стратификации для оценки этих характеристик, используемого, в частности, в [5]. Двухслойная стратификация использовалась также для оценки кинематических характеристик внутренних волн суточного периода K_1 , которые в данном регионе могут проявляться только в форме захваченных мод (в линейной постановке).

Предварительные результаты показали, что при использовании двухслойной стратификации в теплый период года фазовая скорость внутренней полусуточной волны составила 0.42 м/с, а её длина 18.24 км на шельфе Авачинского залива, что соответствовало оценкам, приведенным в [5]. Иная ситуация может наблюдаться в глубоководной части залива, где реальная стратификация зависит от существования постоянного глубоководного термоклина. Здесь существенное влияние могут оказать вторая и третья моды колебаний. Представляет особый интерес сопоставление полученных расчетных характеристик длины внутренних приливных волн по фоновой стратификации с оценками расстояния между пакетами короткопериодных внутренних волн, регистрируемых на спутниковых радиолокационных снимках [6]. Такая информация, в частности, поможет уточнить сведения о локальном преобладании полусуточных или суточных внутренних волн.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 23-17-00174.

Список литературы

- 1) Гилл А. Динамика атмосферы и океана. Том 1.- М.:МИР, 1986г. – С. 147-154.
- 2) Klink J. Dynmodes.m—ocean dynamics vertical modes. Woods Hole (MA): Woods Hole Science Center, SEA-MAT, Matlab tools for oceanographic analysis. 1999. URL: <http://woodshole.er.usgs.gov/operations/sea-mat/index.html> (Дата обращения 10.12.2022).
- 3) Klink J. Calculation of Vertical Dynamic Ocean Modes. AIMS GFD Ocean Exercises: Exercise 2. URL: <https://www.eoas.ubc.ca/~sallen/AIMS-workshop/Ex2-DynamicModes.html#analytical-test-cases> (Дата обращения 10.12.2022).
- 4) Реанализ оперативной системы глобального анализа и прогнозирования океана Меркатора. Copernicus.eu: Copernicus Marine Data Store. URL: https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024/INFORMATION (Дата обращения 24.04.2021).
- 5) Свергун Е.И., Зимин А.В. Характеристики короткопериодных внутренних волн Авачинского залива по данным экспедиционных и спутниковых наблюдений, выполненных в августе – сентябре 2018 года // Морской гидрофизический журнал. – 2020г. -№3. – с. 300-312.
- 6) Свергун Е.И., Зимин А.В., Романенков Д.А., Софьина Е.В. Короткопериодные внутренние волны в шельфовых районах с интенсивной приливной динамикой // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2022, 58(6), 690-705. Doi:10.31857/S0002351522060165

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ВЕТРЫ НА ТЕРРИТОРИИ КРЫМА И ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЯХ: СОВРЕМЕННОЕ И БУДУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ

Полонянкин Д.А.¹, Лубков А.С.², Воскресенская Е.Н.²

¹Филиал МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Севастополе

²Институт природно-технических систем, г. Севастополь

Ключевые слова: ежесекундный реанализ ERA5, порывы ветра, Крым, Чёрное море, Азовское море.

Климатические изменения имеют как глобальную, так и региональную составляющие. В последние десятилетия отмечаются изменения ветрового режима и повторяемости экстремальных ветров, в том числе, в Азово-Черноморском регионе, что обусловило актуальность их изучения.

Ветровые условия являются одной из характеристик климата, существенно влияющих на условия жизни людей и их хозяйственную деятельность. Прежде всего, уязвимы энергетические объекты, портовые сооружения, суда, мосты. Согласно опубликованным результатам [1, 2], в период с 1960 по 1990-е гг. повторяемость сильных и штормовых ветров снизилась в среднем в 2 раза, однако с начала XXI века штормовая активность увеличилась в отдельных районах моря и побережья. В этой связи возникает необходимость раскрыть современные особенности пространственно-временной изменчивости значений порывов скорости ветра на территории Крымского полуострова и акваторий Чёрного и Азовского морей, что и является целью настоящего исследования.

Достаточно детальная информация о порывах ветра была получена из реанализа ERA5, представленного в электронном виде [3]. Массив данных представляет собой характеристики по порывам ветра на высоте 10 м с пространственным разрешением 0.25 градусов, рассчитанный на период с 1959 по 2022 гг.

В работе использовались ежесекундные данные по порывам за период с 1960 по 2021 гг. За счёт высокого разрешения ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$), этот массив данных позволяет учесть большинство географических особенностей Крымского полуострова и акваторий Чёрного и Азовского морей. Эти данные были приведены к максимальным суточным значениям, и затем получены среднемесячные значения суточных максимумов порывов ветра. Для проведения исследования получены временные ряды и оценены их тренды за период с 1960 по 2021 гг. по 5 пространственным регионам: Крымский полуостров, Азовское море, Северо-Западная часть Чёрного моря (СЗЧМ), Западная глубоководная часть Чёрного моря (ЗГЧМ), Восточная глубоководная часть Чёрного моря (ВГЧМ). На этой основе получены основные выводы работы.

На территории Крымского полуострова среднегодовая величина суточных максимумов порывов ветра составила 16.13 м/с. Положительные тренды временных рядов характерны для месяцев с февраля по май и сентября, для остальных месяцев тренды имеют отрицательный знак. При этом тренд для марта является значимым на 5% уровне значимости; рост составил 0.24 м/с за 10 лет.

На акватории Азовского моря среднегодовая величина суточных максимумов порывов ветра составила 18.06 м/с. Положительные тренды временных рядов характерны для февраля, июня, ноября и декабря. Для остальных месяцев тренды отрицательные. При этом тренды для января и июля значимы на 5% уровне; снижение составило 0.53 и 0.27 м/с за 10 лет, соответственно.

На акватории СЗЧМ среднегодовая величина суточных максимумов порывов ветра составила 17.99 м/с. Положительные тренды временных рядов характерны для февраля, мая, сентября, октября и декабря. Для остальных месяцев тренды отрицательны. При этом тренд для июня значим на 5% уровне; снижение составило 0.34 м/с за 10 лет.

На акватории ЗГЧМ среднегодовая величина суточных максимумов порывов ветра составила 18.29 м/с. Положительные тренды временных рядов характерны для февраля, апреля и октября.

Для остальных месяцев тренды отрицательны. Значимые тренды не наблюдаются.

На акватории ВГЧМ среднегодовая величина суточных максимумов порывов ветра составила 17.30 м/с. Положительные тренды временных рядов характерны с февраля по май, для сентября и ноября. Для остальных месяцев тренды отрицательны. При этом тренд для июля является значимым на 10% уровне; снижение составило 0.21 м/с за 10 лет.

Следует отметить, что наименьшие величины максимальных суточных величин порывов ветра характерны для июня в ЗГЧМ, а для июля — во всех остальных пространственных регионах. Наибольшие максимальные суточные величины порывов ветра характерны для января в Азовском море, СЗЧМ и ЗГЧМ; для декабря в ВГЧМ; для марта на территории Крымского полуострова. Наименьшие значения максимальных суточных величин порывов ветра для суши составляют 14.50 м/с; наибольшие — 17.41 м/с. Наименьшие значения суточных величин порывов ветра для акваторий составляют 14.71 м/с (ВГЧМ); наибольшие достигают 20.99 м/с (ЗГЧМ).

Список литературы

- 1) Белокопытов, В. Н. О комплексных исследованиях опасных природных явлений в Азово-Черноморском бассейне / В. Н. Белокопытов, В. В. Фомин, А. В. Ингеров // Морской гидрофизический журнал. – 2017. – № 3(195). – С. 32-48. – DOI 10.22449/0233-7584-2017-3-32-48. – EDN UTZIKM
- 2) Евстигнеев В.П., Наумова В.А., Воскресенская Е.Н., Евстигнеев М. П., Любарец Е. П. Ветроволновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона // Севастополь: ИПТС. - 2017. - 319 с.
- 3) H. Hersbach et al. The ERA5 global reanalysis // Q. J. R. Meteorolog. Soc. – 2020. – №146 (730). – P. 1999-2049

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ В БЕЛОМ МОРЕ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2021 Г.

Пономарев А.А., Подrezова Н.А.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Устойчивость, Белое море, Арктика, плотностная стратификация.

Белое море наиболее обособленное внутреннее море Северного Ледовитого океана. Целиком является внутренними водами России. Соединяется с Баренцевым морем на севере через узкий пролив – Горло.

Исследование плотностной стратификации является важным этапом для решения ряда прикладных задач. Если стратификация устойчива, то она может существовать продолжительное время, препятствуя развитию турбулентности. Неустойчивая стратификация, напротив, провоцирует развитие турбулентности. Для исследуемого Белого моря характерны приливо-отливные явления, которые влияют на стратификацию вод, вызывая очаги неустойчивости.

В работе исследуется тонкая структура Белого моря. Исходными данными послужили значения температуры и солености, полученные в ходе производственной практики студентами Российского Государственного Гидрометеорологического Университета в экспедиционных работах в июне 2021 года. Для сравнения плотностной стратификации Белого моря, было выбрано 7 станций. Точки №1 и №2 находятся на границе с Баренцевым морем, точка №3 находится в Горле Белого моря, точки №4 и №5 относятся к Двинскому заливу и оставшиеся точки №6 и №7 находятся в бассейне Белого моря.

По полученным натурным данным температуры и солености был рассчитан критерий Хессельберга-Свердрупa, а так же определен тип стратификации по слоям. Далее была получена частота повторяемости типов устойчивости в процентном содержании. Для каждой станции построены графики распределения температуры и солености с глубиной.

Первая станция, находится на границе с Баренцевым морем, по центру пролива. Глубина – 61 м. Температура воды на поверхности – 5°C. Соленость воды на поверхности равна 31‰. Типизация определялась в слоях равных 1 м. Преобладающий тип стратификации – полная устойчивость, 35 случаев, что составляет 58%. Тип стратификации – солевые пальцы встречается в 6 случаях (10%). Тип стратификации – послойная конвекция, 18 случаев (30%) и абсолютная неустойчивость всего 1 случай, 2%.

Вторая станция, находится на границе с Баренцевым морем, близ мыса Канин нос. Глубина – 36 м. Температура воды на поверхности – 6°C. Соленость воды на поверхности равна 30‰. Типизация определялась в слоях равных 1 м. Преобладающий тип стратификации – полная устойчивость, 22 случая, что составляет 63%. Тип стратификации – солевые пальцы встречается в 2 случаях (6%). Тип стратификации – послойная конвекция, 11 случаев, что составляет 31% и абсолютная неустойчивость не встречается.

Третья станция, находится в Горле Белого моря. Глубина – 42 м. Температура воды на поверхности – 13°C. Соленость воды на поверхности равна 19‰. Типизация определялась в слоях равных 1 м. Преобладающий тип стратификации – полная устойчивость, 37 случаев, что составляет 90%. Абсолютная неустойчивость встречается в 4 случаях, что составляет 10%. Типы стратификации послойная конвекция и абсолютная неустойчивость не встречаются.

Четвертая станция – самая мелководная, из рассматриваемых, находится в Двинском заливе на границе с Горлом. Глубина – 21 м. Температура воды на поверхности – 13°C. Соленость воды на поверхности равна 19‰. Типизация определялась в слоях равных 1 м. Преобладающий

тип стратификации – полная устойчивость, 18 случаев, что составляет 90%. Типы стратификации послойная конвекция и солевые пальцы встречаются по 1 случаю, что составляет 5%. Тип стратификации абсолютная неустойчивость не встречается.

Пятая станция, находится в Двинском заливе. Глубина – 69 м. Температура воды на поверхности – 7°C. Соленость воды на поверхности равна 25‰. Типизация определялась в слоях равных 1 м. Преобладающий тип стратификации – полная устойчивость, 35 случаев, что составляет 52%. Тип стратификации послойная конвекция встречается в 30 случаях (44%). Тип стратификации солевые пальцы встречается в 3 случаях, что составляет 4%. Тип стратификации абсолютная неустойчивость не встречается.

Шестая станция – самая глубоководная, из рассматриваемых, находится в Бассейне. Глубина – 155 м. Температура воды на поверхности – 10°C. Соленость воды на поверхности равна 25‰. Типизация определялась в слоях равных 5 м. Преобладающий тип стратификации – полная устойчивость, 28 случаев, что составляет 94%. Типы стратификации послойная конвекция и солевые пальцы встречаются по 1 случаю (3%). Тип стратификации абсолютная неустойчивость не встречается.

Седьмая станция, находится на границе Кандалакшского залива с Бассейном. Глубина – 48 м. Температура воды на поверхности – 9°C. Соленость воды на поверхности равна 25‰. Типизация определялась в слоях равных 1 м. Преобладающий тип стратификации – полная устойчивость, 43 случая, что составляет 91%. Тип стратификации солевые пальцы встречается в 4 случаях (9%). Типы стратификации послойная конвекция и абсолютная неустойчивость не встречаются.

Самая теплая вода на поверхности (13°C) наблюдалась в Двинском заливе и Горле, при солености равной 19‰. Наиболее холодным районом оказалась граница с Баренцевым морем, где температура поверхности составляла около 5°C, при солености равной 31‰.

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРИЗАЦИЙ В МОДЕЛИРОВАНИИ УРАГАНОВ В АТМОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ WRF

Поплавский Е.И., Кузнецова А.М., Троицкая Ю.И.

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

Ключевые слова: ураганы, атмосферная модель, WRF, мелкомасштабные процессы, GPS-зонд, профили скорости ветра, верификация.

Наиболее опасными погодными системами являются тропические циклоны. Они наблюдаются преимущественно в тропической зоне, но могут оказывать значительное влияние на погоду умеренных и субтропических зон вследствие внетропического проникновения, которое сопровождается высокими скоростями ветра и сильными ливнями, что в свою очередь приводит к наводнениям как в прибрежных районах, так и во внутренних районах материка. С таким проникновением циклонов связаны сильные шторма в Дальневосточных морях России. В связи с этим практическую ценность представляет прогнозирование и мониторинг подобных явлений, например, оценка силы ветра.

Для предсказания шторма важны расчеты его траектории и интенсивности. В данной работе проводится анализ подходов к моделированию ураганов в атмосферной модели WRF [1] и последующая их верификация данными GPS-зондов, сбрасываемыми над ураганами. Для исследований был выбран мощный ураган типа «Кабо-Верде» Ирма, который развивался в период 30 августа 2017 - 12 сентября 2017 в Атлантическом океане.

Был проведен ряд расчетов с различным набором параметризаций в WRF: рассмотрены такие параметризации планетарного пограничного слоя (ППС) как Yonsei University Scheme (YSU), Mellor–Yamada–Janjic Scheme (MYJ), Mellor–Yamada Nakanishi Niino (MYNN) Scheme, параметризации приповерхностного слоя атмосферы: Revised MM5 Scheme, Eta Similarity Scheme, MYNN Scheme. Кроме того, в последнем домене было протестировано применение вихреразрешающего моделирования. В качестве параметризации микрофизики облачности были использованы схемы Kessler Scheme, WRF Single–moment 3–class Scheme и WRF Single–moment 6–class Scheme, конвекция - Kain–Fritsch Scheme и Tiedtke Scheme. Для описания подстилающей поверхности был использован подход 5–layer Thermal Diffusion Scheme. Для описания коротковолновой и длинноволновой радиации были использованы схемы Dudhia Shortwave Scheme и RRTM Longwave Scheme.

Результаты расчетов сравнивались с данными GPS-зондов. GPS-зонды наряду с буями выступают в качестве ценных источников натуральных измерений в океане необходимых для построения геофизических модельных функций (ГМФ). Однако основной проблемой при определении приповерхностной скорости ветра в экстремальных штормовых условиях для GPS-зондов являются большие погрешности измерений вблизи поверхности. В работе [2] для обработки данных GPS-зондов авторами был предложен метод, позволяющий определить параметры атмосферного пограничного слоя, в том числе и приповерхностную скорость ветра, по измерениям в верхней его части. Преимуществом данного метода является то, что помимо скорости ветра напрямую восстанавливается скорость трения ветра, связанная с касательным турбулентным напряжением. Данная величина характеризует силовое касательное воздействие ветра на водную поверхность и определяет поток энергии к волнам, перемешивание в верхнем слое океана и является движущей силой циркуляции океана. Этот разрабатываемый метод восстановления скорости ветра и построенная на его основе ГМФ были использованы для сравнения и последующей верификации расчетов атмосферной модели для случая урагана Ирма.

На основе сравнения данных расчетов WRF с данными реанализа и с обработанными данными GPS-зондов проведен анализ подходов к моделированию в атмосферной модели. Наблюдалась

проблема предсказания моделью не только интенсивности урагана, но и его траектории. Предложен набор параметризаций, наилучшим образом описывающий траекторию и интенсивность урагана. Обсуждаются пути улучшения результатов расчета.

Работа поддержана грантом президента МК-2489.2022.1.5 (проведение численного моделирования и сравнения с данными GPS-зондов) и проектом РНФ 21-17-00214 (обработка данных с GPS-зондов и восстановление поля скорости ветра по спутниковому изображению).

Список литературы

- 1) Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Duda M. G., Huang X-Y, Wang W., and Powers J. G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. // NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp. 2008.
- 2) Ермакова О.С., Сергеев Д.А., Русаков Н.С., Поплавский Е.И., Баландина Г.Н., Троицкая Ю.И. Восстановление параметров приземного пограничного слоя в тропическом циклоне по данным падающих GPS-зондов. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Т. 16. № 5. С. 301–309. 2019.

СТРУКТУРА И ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛЮМА РЕКИ ПЕЧОРА В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Рогожин В.С.^{1,2}, Осадчиев А.А.^{2,3}, Коновалова О.П.¹

¹Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Институт океанологии РАН, г. Москва

³Московский Физико-технический институт, г. Москва

Ключевые слова: Баренцево море, речной плюм, поверхностная соленость, ветровое воздействие, синоптическая изменчивость, сезонная изменчивость, Баренцево море, Печорское море, река Печора.

Река Печора формирует значительный по площади речной плюм в юго-восточной акватории Баренцева моря, называемой также Печорским морем. Несмотря на многочисленные работы, посвященные данному региону [1,2,3,4], плюму Печоры уделялось сравнительно небольшое внимание, и многие базовые аспекты его структуры и изменчивости остаются неизученными.

В данной работе было исследовано распространение плюма Печоры в Печорском море в летне-осенний безледный период на основе многолетних натуральных измерений (13 рейсов в период 1993-1995, 1998; 2014, 2016-2021 гг.) и спутниковых наблюдений. По этим данным была установлена зависимость области распространения и пространственных характеристик плюма Печоры от внешних условий, а именно, ветра, речного расхода и ледовых условий в момент начала половодья. Было выявлено, что увеличение площади плюма происходит при северо-восточных и восточных ветрах скоростью 5 м/с и более, уменьшение площади – при ветрах северо-западного направления. Время минимального ветрового воздействия, необходимого для изменения границ плюма, весьма невелико и составляет от 1.5 до 2 суток. Такой быстрый отклик плюма на изменчивость ветра приводит к тому, что сильный (скоростью более 12 м/с) и продолжительный (более 3 суток) ветер приводит к интенсивному перемешиванию плюма Печоры с нижележащими морскими водами. В результате этого в период сильных ветров площадь плюма Печоры за несколько дней может сократиться в 4-6 раз с 30 000 - 36 000 км² до 6 000 – 7 000 км².

Кроме того, были описаны три основных типа распространения плюма Печоры и установлены внешние условия формирования этих типов. При первом («минимальном») типе распространения опреснённые воды плюма после выхода из Печорской губы распространяются на восток вдоль побережья Печорского моря в виде узкой струи (шириной 20–40 километров). В такой ситуации плюм не доходит даже до о. Долгий, занимая лишь южную и восточную части Печорской губы, а также акваторию вблизи п. Варандей на южном побережье Печорского моря. В этом случае, площадь плюма невелика и составляет примерно 6 000 – 7 000 км² (1993, 1994, 1995, 1998, 2019 годы). При втором («среднем») типе распространения плюм Печоры занимает всю восточную часть Печорского моря. При этом типе распространения площадь плюма составляет 20-22 тыс. км² (2014, 2016, 2021 годы). Третий («максимальный») тип распространения плюма Печоры характеризуется относительно далекими затоками вод плюма на запад от Печорской губы и/или на восток до пролива Карские ворота и далее в Карское море. В этом случае площадь зоны опреснения увеличивается до 25 000 - 28 000 км², а внешняя граница плюма сдвигается на 40-50 км к северу относительно «среднего» типа (2017, 2018, 2020 годы).

Совместный анализ большого массива натуральных и спутниковых данных также позволил изучить изменчивость плюма Печоры на синоптическом, сезонном и межгодовом временных масштабах. Так, помимо ветрового воздействия, значительное влияние на сезонную и межгодовую изменчивость плюма Печоры оказывают колебания речного стока. За период половодья с мая по июль площадь плюма Печоры может увеличиться с 7 000 до 25 000 км² из-за поступления значительного объема речных вод. Межгодовая изменчивость объемов речного стока может достигать до 80

км³ (т.е. до 40% среднегодового стока), что существенно влияет на разницу в значениях солености в плюме в Печорской губе и в Печорском море. Третьим по важности фактором изменчивости плюма Печоры является межгодовая изменчивость ледовых условий в Печорском море. Влияние этого фактора на изменение пространственной и вертикальной структуры плюма происходит только в случае совпадения сроков ледотаяния с периодом половодья, во время которого происходит формирование плюма Печоры за пределами Печорской губы. При таянии больших объемов морского льда в юго-восточной акватории моря в период половодья значительные объемы талой воды вовлекаются в плюм Печоры. В результате этого площадь плюма достигает наибольших значений за исследуемый период, превышая 35 000 км².

Также, по данным температуры поверхности моря ранее не известные процессы адвекции плюма Печоры через пролив Карские Ворота в Карское море, и формирование значительной области повышенной солености вдоль южного побережья Печорского моря. внутри плюма Печоры в результате прибрежных ветровых апвеллингов.

Стоит отметить, что изучение плюма Печоры важно для понимания различных процессов, происходящих в экосистеме Печорского моря. Колебания термохалинных характеристик вод Печорского моря напрямую или опосредованно влияет на жизнедеятельность различных гидробионтов. Также, в последние десятилетия активно развивается хозяйственное освоение акватории Печорского моря. С 2013 года в центральной части моря функционирует единственная в российском секторе Арктики морская ледостойкая стационарная платформа “Приразломная”. С 2008 года вблизи поселка Варандей располагается морской нефтеналивной терминал “Варандейский”. Эксплуатация данных объектов производится в сложных ледовых условиях, формирование которых во многом определяется распределением речного стока в море. Понимание механизма распространения речного стока и формирования зоны опреснения в Печорском море в дальнейшем может использоваться при разработке систем управления ледовой обстановкой в данном регионе.

Список литературы

- 1) Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Кондаков А. А. и др. Международная (американо-норвежско-российская) экологическая экспедиция в Печорское море, на Новую Землю, Колгуев, Вайгач, Долгий в июле 1992 г. (НИС “Дальние Зеленцы”): Препр. Апатиты, 1992. 32 с.
- 2) Loeng H., Ozhigin V., Ådlandsvik B. Water fluxes through the Barents Sea //ICES Journal of Marine Science. – 1997. – Т. 54. – №. 3. – С. 310-317
- 3) Smedsrud L. H. et al. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system //Reviews of Geophysics. – 2013. – Т. 51. – №. 3. – С. 415-449
- 4) Skagseth Ø. et al. Reduced efficiency of the Barents Sea cooling machine //Nature Climate Change. – 2020. – Т. 10. – №. 7. – С. 661-666

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЕРХНЕГО КВАЗИОДНОРОДНОГО СЛОЯ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

Родикова А.Е.¹, Гордеева С.М.^{1,2}

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

²Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Баренцево море, верхний квазиоднородный слой, климатическая изменчивость.

В последние тридцать лет потепление в Арктике происходит в два раза быстрее, чем в других областях планеты [1, с.19]. В состав важных климатических характеристик входит верхний квазиоднородный слой (ВКС). Глубина его нижней границы зависит от процессов обмена теплом и импульсом между океаном и атмосферой, а её изменение служит одним из индикаторов содержания тепла, поступающего из атмосферы.

Исследования верхнего квазиоднородного слоя проводились для многих морей и океанов в южных широтах, например, для Эгейского, Мраморного, Черного и Азовского морей [2, 3]. В Арктической зоне не так много исследований по данной теме. В 2007-2008 годах для Карского и Лаптевых морей проводилась оценка прогрева верхнего поверхностного слоя [4], а также исследование глубокой конвекции в Гренландском море и морях Лабрадор и Ирмингера [5].

Целью работы является оценка климатических изменений толщины верхнего квазиоднородного слоя в Баренцевом море. На основе среднемесячных глубоководных данных температуры и солёности реанализа CMEMS GLORYS2V4 за два периода 1993-1997 гг. и 2016-2020 гг. рассчитана глубина нижней границы ВКС в Баренцевом море (с границами по широте 67° с.ш. – 80° с.ш., по долготе 20° в.д. – 65° в.д.).

Для расчёта глубины нижней границы ВКС в работе использовался пороговый метод Кага et al., 2003 [3], основанный на изменении плотности на заранее определённую величину относительно значения на реперном горизонте. В данной работе для устранения влияния радиационного прогрева поверхностной толщ воды реперный горизонт располагался на глубине 10 м. Критерий рассчитывался как разность плотности на реперном горизонте при температуре и солёности (реперная плотность) и плотности, рассчитанной по той же солёности и температуре меньше реперной на 0.1°C . Критерий сравнивался с фактической разностью плотности на каждом горизонте и реперной плотностью, и за нижний горизонт ВКС принималась глубина, на которой эти разность больше критерия.

Анализ вертикальных профилей температуры, солёности и плотности в Баренцевом море показал, что в 2016-2020 гг. относительно 1993-1997 гг. во всех рассматриваемых точках солёность изменялась незначительно, в то время как наблюдался рост температуры воды в среднем по всей толще от поверхности до дна. Например, в точках 70° с.ш. 35° в.д. и 74° с.ш. 30° в.д. температура увеличилась с 2.5°C до 3.9°C . Там же за счёт роста температуры произошло понижение плотности с 1027.8 кг/м^3 до 1027.6 кг/м^3 .

В среднем многолетнем сезонном ходе глубина нижней границы ВКС в Баренцевом море минимальна в период прогрева поверхности в мае-октябре, начинает увеличиваться с началом ледостава и усилением ветрового перемешивания, и максимальна в феврале-марте. К маю льды начинают таять, начинается прогрев поверхности, и нижняя граница перемешанного слоя резко уменьшается.

Средняя по акватории глубина нижней границы ВКС в 2016-2020 гг. относительно 1993-1997 гг. в летний период не претерпела сильных различий и находится в диапазоне от 11 м. до 18 м., а в зимний период – значительно увеличилась с 30-33 до 51-58 м. Это связано, прежде всего, с тем, что принципиально изменилось пространственное распределение зон повышенной глубины

нижней границы ВКС. По пространственному распределению заглублиение ВКС зимой наиболее значительно у границы льдов, и если в 1993-1997 гг. наибольшие глубины нижней границы ВКС отмечались в юго-западном районе моря, в зоне действия ветвей Северо-Атлантического течения, то в 2016-2020 гг. зона значительного заглублиения ВКС занимает практически всё море, достигая дна на банках и прибрежном шельфе. Скорее всего, это связано с тем, что к 2016-2020 гг граница распространения льда располагается значительно севернее, и это даёт большее пространство для конвективных и турбулентных процессов на открытой поверхности моря зимой.

Кроме увеличения глубины ВКС можно отметить сдвиг в наступлении максимума на один месяц: от февраля в 1993-1997 гг. к марту в 2016-2020 гг. Такая же картина характерна и для пространственного распределения максимальных по морю глубин нижней границы ВКС. В 1993-1997 гг. полностью перемешанный слой достигает максимальных значений по глубине в феврале (334 м), после чего резко начинает уменьшаться (до 18 м), а в 2016-2020 гг. в связи с изменениями ледовых условий перемешанный слой продолжает заглубливаться до марта (356 м). Но, несмотря на маленькую разницу в максимумах, в первое пятилетие они наблюдались только в одном районе, в основном 72-74с.ш. 20-30в.д., а во втором пятилетии места больших однородных слоёв распространилась к северо-востоку до 76с.ш. 50в.д..

Таким образом, можно сделать вывод, что в связи с потеплением вод Баренцева моря и значительным освобождением его ото льда к 2016-2020 гг. нижняя граница перемешанного слоя зимой на больших открытых акваториях центральной части Баренцева моря значительно углубилась. Так что толща Баренцева моря становится хорошо вентилируемой и по вертикали – более однородной.

Работа выполнялась в рамках государственного задания № 0128-2021-0014.

Список литературы

- 1) Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.:Наукоёмкие технологии, 2022. – 124 с.
- 2) Кубряков А. А., Белокопытов В. Н., Зацепин А. Г., Станичный С. В., Пиотух В. Б. Изменчивость толщины перемешанного слоя в Черном море и ее связь с динамикой вод и атмосферным воздействием // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, №5. С. 449–468. doi:10.22449/0233-7584-2019-5-449-468
- 3) Kara, A. B., Rochford, P. A., Hurlburt, H. E. Mixed layer depth variability over the global ocean//J. Geophys. Res. 2003. Vol.108. Pp. 3079, doi:10.1029/2000JC000736, C3
- 4) Власенков Р.Е., Смирнов А.В., Макштас А.П. Оценка потенциального прогрева поверхностного слоя морей Карского и Лаптевых в 2007 и 2008 гг.// Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2(85). С. 35-39
- 5) Башмачников И. Л., Федоров А. М., Весман А. В., Белоненко Т. В., Колдунов А. В., Духовской Д.С. Термохалинная конвекция в субполярных морях Северной Атлантики и Северо-Европейского бассейна СЛО по спутниковым и натурным данным. Часть1: Локализация областей конвекции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, №7. С. 184–194

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПОТОКОВ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ АНСАМБЛЯ МОДЕЛЕЙ СМIP6

Романенко В.А.^{1,2}

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский вычислительный центр, г. Москва

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Баренцево море, турбулентный теплообмен, моделирование климата, СМIP6.

Баренцево море является окраинным морем северо-запада России. Данный регион стратегически важен для нашей страны, поскольку его южная и юго-западная часть вследствие отепляющего воздействия течений Атлантического океана даже в самые суровые годы не замерзает. Этот факт положительно влияет на развитие судоходства по Северному морскому пути и другой хозяйственной деятельности в Баренцевом море. В частности, здесь активен рыболовный промысел, а также ведется добыча полезных ископаемых на шельфе. Для Арктической климатической системы этот регион имеет ключевое значение, особенно в зимний период, поскольку именно в Баренцевом море зимой происходит отдача тепла от океанического притока в атмосферу посредством интенсивных потоков явного и скрытого тепла. По современным оценкам, практически все тепло, поступающее в море через западную границу, переходит в атмосферу [2]. Потоки тепла в Баренцевом море могут также оказывать воздействие на формирование аномалий климата во всем Северном полушарии [1].

Пространственно-временные особенности полей потоков тепла, их изменчивости и многолетних трендов в данном регионе многие десятилетия остаются объектом пристального изучения. Их исследование позволяет дополнить существующие знания об энергетике климатической системы в целом, о факторах формирования общей циркуляции атмосферы и региональных особенностях климата Арктики с точки зрения фундаментальной науки. В прикладном аспекте эти сведения позволяют уточнять влияние теплообмена между океаном и атмосферой на формирование опасных гидрометеорологических явлений как в этом регионе, так и в средних широтах в целом, что, в конечном счете, позволяет разрабатывать стратегии минимизации от наносимого ими ущерба. Значительный интерес представляет изучение пространственно-временной структуры потоков тепла в западном секторе российской Арктики и неопределенности оценок этих потоков по данным реанализов и климатических моделей. Изменения потоков способны значительно повлиять на атмосферную циркуляцию в умеренных и полярных широтах Северного полушария, на темп потепления арктического климата и, следовательно, на интенсивность арктического усиления.

В работе производилась оценка неопределенности потоков турбулентного тепла в Баренцевом море по данным ансамбля климатических моделей проекта моделей СМIP6 [3] с целью выявления отклика изменения потоков тепла на изменение других метеорологических параметров: температуры воздуха и температуры поверхности океана (ТПО), концентрации морского льда (КМЛ) и скорости ветра. Для выполнения поставленных задач были собраны и подготовлены для исследования исходные данные результатов моделирования более 30 моделей проекта СМIP6, применены методы анализа многолетних климатических рядов, изучен сезонный ход потоков тепла по различным моделям, рассчитаны временные ряды.

В настоящей работе был рассчитан годовой ход потоков тепла, КМЛ, ТПО, температуры воздуха и скорости ветра за 1980 – 2000 гг. и 2000 – 2020гг. по всем моделям проекта СМIP6 для сценариев SSP245 и SSP585. Также в работе были рассчитаны временные ряды всех переменных за 1980-2100гг. по обоим сценариям и сглажены с помощью скользящего среднего с 10 летним ок-

ном. Для выявления связи между потоками тепла с концентрацией морского льда и температурой были построены диаграммы рассеяния.

По результатам работы можно сделать выводы, что наибольшие потоки как явного, так и скрытого тепла, наблюдаются в зимнее время года, в период с декабря по март. В марте в течение 1980 – 2100гг. отмечается значительный рост потока скрытого тепла, который к 2100г. увеличится в два раза по отношению к 1980г. Он объясняется, прежде всего, быстрым сокращением КМЛ. Увеличение отдачи явного тепла в атмосферу происходит нелинейно, с ростом до 2060 г., после чего поток явного тепла постепенно начинает снижаться в целом для анализируемых моделей. В сентябре рост потока скрытого тепла будет происходить в течение всего периода исследования и к 2100 г. его величина превысит таковую на 1980г. в полтора раза. Явное тепло, наоборот, за это время уменьшится в два раза, что связано с более быстрым ростом температуры воздуха по сравнению с ТПО. Отмечаются признаки нелинейной связи потоков явного тепла с изменениями площади льда и температуры над Баренцевым морем в марте. Максимальные потоки в среднем для моделей отмечаются при концентрациях льда в диапазоне 30%..50% и температурах -5..-10 °С. При больших, как и при меньших концентрациях и температурах потоки слабее.

РНФ №19-17-00242, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН.

Список литературы

- 1) Semenov, V.A., Latif, M., Dommenges, D., Keenlyside, N.S., Strehz, A., Martin, T., Park, W., 2010. The impact of North Atlantic–Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature. *J. Clim.* 23 (21), 5668–5677. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3347.1>
- 2) Smedsrud, L.H., Esau, I., Ingvaldsen, R.B., Eldevik, T., Haugan, P.M., Li, C., Lien, V.S., Olsen, A., Omar, A.M., Otterå, O.H., Risebrobakken, B., 2013. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Rev. Geophys.* 51(3), 415–449. <https://doi.org/10.1002/rog.20017>
- 3) <https://data.ceda.ac.uk/badc/cmip6/data/CMIP6>

АЙСБЕРГИ МОРЯ РОССА

Романов И.А., Подрезова Н.А.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: шельфовый ледник Росса, айсберг, море Росса, Антарктика, дрейф айсбергов.

Море Росса – окраинное море тихоокеанского сектора Южного океана у берегов Западной Антарктиды. Южная часть моря покрыта крупнейшим шельфовым ледником Росса – крупнейшим шельфовым ледником в Антарктиде, который имеет площадь около 487 000 км² (немного меньше площади Франции). Ледник находится на плаву, поднимается и опускается под действием приливов и отливов. Под действием волн большие куски шельфового льда отламываются и превращаются в столовые айсберги. В 2000 году от ледника Росса откололся в результате механической абляции самый большой известный на данный момент айсберг В-15 площадью свыше 11000 км². Открытая часть моря почти круглогодично занята дрейфующими льдами.

В работе использовались данные Национального ледового центра США (USNIC) – ежемесячные значения размера айсбергов, а так же их координаты [1]. Названия айсбергов происходят от антарктического квадрата, в котором они были первоначально замечены. Квадранты разделены против часовой стрелки следующим образом:

A = 0° – 90° з. д. (море Беллинсгаузена/Уэдделла);

B = 90° – 180° з. д. (море Амундсена/восточная часть моря Росса);

C = 180° – 90° в. д. (западная часть моря Росса/Земля Уилкса);

D = 90° – 0° в. д. (Эймери/Восточное море Уэдделла) [2].

В работе рассчитывалось изменение размеров и площади айсбергов, а также их траектория. Выбранные айсберги (B091, B39, и B50), находящиеся в море Росса, отслеживались в период с декабря 2020 по декабрь 2022 года.

Айсберг B091. Начальные размеры айсберга в декабре 2020 года составляли 12 морских миль в длину и 6 морских миль в ширину, что соответствует 22,2 и 11,1 в километрах. Площадь айсберга составляла 246,42 км². Айсберг дрейфовал до мая 2022 года, не изменяя своих размеров. В мае этого же года он раскололся, и его размеры составили 8×3 морские мили, что соответствует 14,8×5,6 в километрах. Его площадь уже составляла около 83 км². Далее айсберг продолжил раскалываться и к июлю 2022 года уже не отслеживался из-за малых размеров. В целом, айсберг B091 за 2 года преодолел расстояние равное - 2808 км.

Айсберг B39. Начальные размеры айсберга в декабре 2020 года составляли 8 морских миль в длину и 4 морские мили в ширину, что соответствует 14,8 и 7,4 в километрах. Его площадь составляла 109,52 км². Айсберг так же отслеживался до декабря 2022 года, т.е. в течении двух лет. За исследуемый период айсберг B39 не изменился в своих размерах. Его дрейф составил 4238 км в прибрежной зоне Антарктиды. За исследуемый период айсберг пересек море Космонавтов, море Ларсена, море Рисер-Лазарева и в конце исследования дрейфовал в море Уэдделла, в котором его скорость существенно снизилась.

Айсберг B50. Начальные размеры айсберга в декабре 2020 года составляли 15 морских миль в длину и 6 морских миль в ширину, что соответствует 27,8 и 11,1 в километрах. Его площадь составляла 308,58 км². В мае 2022 года он начал раскалываться, и его размеры составили 14×5 морских миль, что соответствует 25,9×9,3 в километрах, площадь – 240,87 км². В августе 2022 года от айсберга откололись небольшие куски, которые не отслеживались в дальнейшем. После этого размеры айсберга составили 10×3 морские мили или 18,5×5,6 в километрах, площадь – 103,6 км². В сентябре этого же года айсберг раскололся на еще более мелкие части, которые в дальнейшем не отслеживались. В целом, айсберг B50 за 2 года преодолел расстояние равное - 3108 км.

Список литературы

- 1) U.S.National Ice Center. Available at: <https://usicecenter.gov/> (Accessed 06.01.2023)
- 2) Все что вы должны знать об Антарктических айсбергах [сайт]. URL: <https://oceanwide-expeditions.com/blog/everything-you-need-to-know-about-antarctic-icebergs> (дата обращения: 06 января 2023)

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОЩАДИ ЛЬДА БЕЛОГО МОРЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СУРОВОСТИ ЗИМ

Романюкина С.А., Подрезова Н.А.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург.

Ключевые слова: ледовитость, Белое море, Арктика, классификация зим.

В работе исследуются межгодовая и сезонная изменчивости площади льда Белого моря в зависимости от суровости зимы. Исходными данными послужили среднемесячные значения площади льда Белого моря с 1978 по 2021 года [1], а также ежедневные значения температуры атмосферы г. Архангельска с 1885 по 2021 года для расчета суммы градусо-дней мороза (СГДМ) [2]. Также в работе проводилось разделение зим по суровостям

Кривые изменчивости среднегодовой ледовитости Белого моря, а также СГДМ г. Архангельска показывают нам, что последние имеют отрицательные тренды. Максимальная ледовитость наблюдается зимой 1984/85 года и составляет 570 км². Для этой же зимы соответствует и максимальное число СГДМ равное 2260. Минимальная ледовитость наблюдается зимой 2017/18 года и составляет 210 км², что соответствует 1138 СГДМ. Минимальное же значение СГДМ наблюдается зимой 2019/20 года и составляет всего 713. Также отметим тот факт, что тренд ледовитости снижается гораздо сильнее тренда СГДМ [3].

Для анализа изменчивости СГДМ г. Архангельск было выбрано 3 различных по типу зим – суровая (1984/85), умеренная (1980/81) и мягкая (2019/20). С сентября по декабрь между умеренной и суровой зимами не наблюдается больших различий. Но уже в январе в суровую зиму СГДМ почти достигает значения 800 СГДМ, в то время как в умеренную зиму значения колеблются около 300 СГДМ. Февраль в суровую зиму показывает значения в 630 СГДМ, что говорит о продолжительных морозах в течении зимы. В апреле-мае значения во всех зимах не превышают 100 СГДМ. Максимум в мягкую зиму наблюдается в январе и составляет 220 СГДМ. Отметим, что в умеренную зиму с ноября по март не наблюдается пиков, и все значения СГДМ находятся в пределах 300.

В результате проведенного исследования, мы выделили трендовые компоненты, которые показывают сокращение льда Белого моря, а также уменьшение СГДМ в г. Архангельск. За последние 20 лет наблюдалось 3 суровые зимы, 11 мягких и 6 умеренных.

Список литературы

- 1) Арктический и антарктический научно-исследовательский институт [сайт] URL:<http://wdc.ari.ru/datasets/> (дата обращения: 25 сентября 2022)
- 2) Библиотека климатических данных [сайт]. URL: aisori.meteo.ru (дата обращения: 24 сентября 2022)
- 3) Teider M.S., Oskotskaia S.A., Frolova N.S., Podrezova N.A. The assessment of Arctic sea ice area changes. В сборнике: Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Proceedings of 7th International Conference. Сер. "Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences" 2022. С. 231-241

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПРОФИЛЯ ВЕТРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ВЕТРОВЫХ ВОЛН

Ромащенко Д.Д.¹, Булгаков К.Ю.²

¹Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, Санкт-Петербург, Россия

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: волновой пограничный слой, обратный возраст волны, турбулентный обмен, волновой поток импульса.

Пограничный слой над волнами отличается от пограничного слоя над твердой поверхностью появлением дополнительного механизма вертикального волнового потока импульса, созданного непосредственно искривленной и движущейся водной поверхностью.

Влияние волн на турбулентный обмен в волновом слое в современных моделях циркуляции атмосферы параметризуется путем изменения шероховатости поверхности в зависимости от динамического воздействия атмосферы. Для этого используется формула Чарнока.

$$z_0 = 0.02 \frac{v_*^2}{g} \quad (5)$$

где z_0 – параметр шероховатости, v_* – скорость трения, g – ускорение силы тяжести.

Такой подход не может в полной мере воспроизвести влияние волн на атмосферную циркуляцию, так как в нем не учитывается степень развития волн, которую учитывают в уравнениях через так называемый обратный возраст волны.

$$\Omega_k = \frac{U(\frac{\lambda_k}{2})}{c_k} = \frac{\omega_k U(\frac{\lambda_k}{2})}{g} \quad (6)$$

где Ω_k – обратный возраст волны, $\omega_k = |gk|^{1/2}$ – циклическая частота, k – волновое число, $c_k = g/\omega_k$ – фазовая скорость k -ой моды, U – скорость ветра при высоте $\zeta = \lambda_k/2$, где $\lambda_k = 2\pi/k$.

В [1] формулируется одномерная модель волнового пограничного слоя, её отличие от модели приземного слоя атмосферы заключается в введении в уравнение движения волнового потока импульса.

$$\tau_w(z) = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} \omega_j^2 \beta(\Omega_{i,j}) S(\omega_j, \theta_i) \exp\left(-G(\tilde{\omega}) \frac{\omega_j^2 z}{g}\right) \Delta\omega_j \Delta\theta_i \quad (7)$$

где N – число точек сетки, M – количество волновых чисел, ω – частота, S – двумерный волновой спектр, $\beta(\Omega_{i,j})$ – мнимая часть бета-функции, Ω – кажущаяся (вычисленная по направлению ветра) безразмерная частота, $G(\tilde{\omega})$ – слабая функция, где $\tilde{\omega} = \Omega/\Omega_P$, Ω_P – кажущаяся частота, приходящаяся на пик спектра, $\Delta\theta_i$ – шаг сетки по углу, $\Delta\omega_j$ – шаг сетки по частоте.

Данная модель непосредственно учитывает воздействие волн, заданных произвольным двумерным волновым спектром, формирующим волновой поток импульса.

В качестве входных данных использовались значения скорости ветра на 10 метрах и волновой спектр, эти данные были получены в результате работы системы прогноза ветровых волн, состоящей из моделей WRF и WAVEWATCH III, которая была адаптирована для региона Балтийского моря.

В результате работы были получены профили скорости ветра, а также профили турбулентного и волнового потоков импульса. График профилей потоков импульса показывает уменьшение волнового и увеличение турбулентного потоков импульса ($\text{м}^2/\text{с}^2$) с высотой. При учете волнового

потока импульса, скорость ветра у водной поверхности, в отличие от логарифмического профиля ветра, больше. С увеличением высоты скорость ветра плавно возвращается к логарифмическому профилю ветра.

Результаты исследований выполнены в рамках гос. задания (№ FMWE-2021-0014).

Список литературы

- 1) Chalikov D., Rainchik S. Coupled numerical modelling of wind and waves and the theory of the wave boundary layer //Boundary-layer meteorology № 1(138). 2010. P. 1–41. doi:10.1007/s10546-010-9543-7
- 2) Chalikov D.V., Bulgakov K.Yu. The structure of surface layer above sea //Fundamental and applied hydrophysics № 2(12). 2019. P. 50–65. doi: 10.7868/S2073667319020072

МОДЕЛИРОВАНИЯ СОБЫТИЙ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ДНЕВНОГО ПРОГРЕВА В ЧЕРНОМ МОРЕ НА ОСНОВЕ ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ РОМ

Рубакина В.А., Кубряков А.А., Станичный С.В., Медведева А.В.

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: Черное море, амплитуда суточного хода температуры, экстремальный дневной прогрев, модель РОМ, коэффициент поглощения морской воды.

Для современной океанологии исследование суточного хода температуры поверхностного слоя моря/океана (далее ТПМ/ТПО) – это одна из наиболее актуальных задач, так как суточный ход температуры влияет на формирование ветров [1], а также оказывает значительное воздействие на турбулентный обмен теплом и импульсом между океаном и атмосферой. Изменчивость стратификации вод, которая непосредственно зависит от суточных колебаний потоков тепла, также влияет на физические и биогеохимические процессы в верхних слоях моря (океана) [1]. Одним из параметров, характеризующих суточный ход ТПМ, является амплитуда суточного хода температуры (далее A), характеризующая величину суточного прогрева, и зависящая от различных гидрометеорологических факторов. При исследовании суточного хода температуры отдельный интерес представляют события значительного и экстремального дневного прогрева, которые формируются в условиях малой облачности при малых скоростях ветра (до 4–5 м/с) [2, 3]. Величины A для таких событий значительно превышают среднюю A для того сезона года, в котором были выделены данные событие прогрева. Для весенне-летнего периода A в отдельных случаях могут превышать 4,5–5°C (и даже достигать 7°C), что подтверждают как спутниковые измерения, так и данные термодрифтеров [2, 3]. Однако следует отметить, что в современных численных моделях величины A чаще всего несколько занижены, а события значительного и экстремального дневного прогрева и вовсе не воспроизводятся [4].

Настоящее исследование посвящено вопросу воспроизведения событий экстремального дневного прогрева с использованием одномерной гидродинамической модели РОМ, подробное описание которой представлено в работах [5]. В экспериментах использовалась нерегулярная по вертикали сетка $\Delta z=0,05$ м от 0 до 5 м; $\Delta z=0,2$ м от 5 до 10 м; $\Delta z=1$ м от 10 до 30 м; $\Delta z=2$ м от 30 до 50 м; $\Delta z=5$ м от 50 до 110 м; $\Delta z=20$ м от 110 до 410 м. Сезонная изменчивость атмосферных параметров задавалась по данным реанализа ERA-40, проведенного в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) с временной дискретностью 6 ч (Uppala, et al., 2005). Поля атмосферных параметров были осреднены за 1971–2001 гг. по акватории центральной части бассейна. В качестве массива коротковолнового излучения был использован массив реанализа Era5 с временной дискретностью 1 час за 2009 год в центральной точке бассейна Черного моря с координатами 43° с.ш., 34° в.д.

В ходе выполнения ряда численных экспериментов были получены следующие результаты. Изменение коэффициент поглощения в оптическом диапазоне k_1 практически не влияет на амплитуду суточного хода в верхнем слое 1–2 м. В то же время, k_1 более существенно влияет на амплитуду изменчивости температуры в нижних слоях. Выраженная зависимость A наблюдается от параметра R – доли оптического излучения. При увеличении доли ИК радиации, A значительно возрастает при малых значениях толщины ВКС, достигая 6°C при $R=10$ –20% для малых значений глубины перемешанного слоя. Следует отметить, что R –относительно постоянная величина, и её вариации малы. Изменение k_2 , коэффициента поглощения в ИК диапазоне, оказывает наиболее существенное влияние на температуру в верхнем слое вод. Получено, что A величиной 7–10°C могут наблюдаться лишь при очень малых величинах верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) (10–20 см). Для воспроизведения интенсивного дневного прогрева необходимо использовать другие значения k_2 . При заданных параметрах в слое 20 см прогрев 7°C достигается при

значении $k_2=8$. Эта величина больше, чем используемая стандартно 5, но тем не менее, значительно меньше реальных оценок среднего коэффициента поглощения в ИК-диапазоне. Однако при стандартных параметрах расчета турбулентности (параметр фоновой турбулентной вязкости $UMOLPR=10^{-5}$ м²/с, A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 – эмпирические константы, равные 0,92; 0,74; 16,6; 10,1; 0,08, соответственно) даже при отсутствии ветра A составляют всего 0,5–1,5°С, а изменение k_2 слабо влияет на прогрев. При искусственном задании коэффициента турбулентной диффузии $k_h=0$ м²/с A возрастает, однако ее величина не превышает 3°С. При уменьшении фоновой вязкости от 10^{-5} до 10^{-6} м²/с (при $k_h=0$ м²/с) модель успешно воспроизводит амплитуды прогрева 6–7°С. При уменьшении параметров Меллора-Ямады в 10–100 раз (для этого экспериментального расчета A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 принимались равными 0,1; 0,1; 1,6; 1,1; 0,08 соответственно) также были достигнуты величины суточного хода 6–7°С на второй и третий день расчета. Однако с такими параметрами модели Меллора-Ямады сезонный ход температуры не воспроизводился, точно также, как и с величиной $k_h=0$ м²/с. Модель Меллора-Ямады значительно переоценивает интенсивность турбулентности в тонком ВКС. Можно заключить, что для параметризации и правильного описания изменчивости температуры верхнего слоя нужны усовершенствованные схемы турбулентности у поверхности моря.

Исследование событий значительного дневного прогрева выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-35-90084. Оценка влияния оптических характеристик на амплитуду суточного хода выполнена в рамках государственного задания по теме № FNNN-2021-0006.

Список литературы

- 1) Stuart-Menteth, A.C. A global study of diurnal warming using satellite-derived sea surface temperature // Journal of Geophysical Research: Oceans. Vol. 108. №С5. 2003.
- 2) Rubakina V. A., Kubryakov A. A., Stanichny S. V. Seasonal variability of the diurnal cycle of the Black Sea surface temperature from the SEVIRI satellite measurements // Physical Oceanography. Vol. 26. №. 2. 2019. P. 157-169
- 3) Рубакина В. А., Кубряков А. А., Станичный С. В. Сезонный и суточный ход температуры вод Чёрного моря по данным термопрофилирующих дрейфующих буёв //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. –Т. 16. №. 5. 2019. С. 268-281
- 4) Rubakina V. A., Kubryakov A. A., Stanichny S. V., Mizyuk A. I. Properties of the Vertical Distribution of Diurnal Temperature Variations in Different Seasons in the Black Sea Based on the NEMO Model Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. Vol. 58. №. 1. 2022. P. 54-67
- 5) Кубрякова, Е.А. Моделирование процессов горизонтального и вертикального транспорта соли и биогенных элементов в Черном море: дис. . . . канд.физ.-мат. наук: 25.00.28. – ФГБУН МГИ, Севастополь, 2019. 179 С.

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ЛЕДОВИТОСТИ В ЗАПАДНОМ СЕКТОРЕ АРКТИКИ НА ПРИМЕРЕ АРХИПЕЛАГОВ ШПИЦБЕРГЕН И ЗЕМЛЯ ФРАНЦА-ИОСИФА

Руденко Н.О.^{1,2}, Иванов Б.В.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: Земля Франца-Иосифа, Шпицберген, морской лёд, ледовитость, температура поверхности воды, приземная температура воздуха, долгопериодные изменения, сезонная и межгодовая изменчивость.

Работа посвящена анализу межгодовой и сезонной изменчивости ледовитости в акватории архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) за период 1979-2020 гг. Для исследования динамики ледяного покрова в рассматриваемом регионе были использованы однородные ряды спутниковых наблюдений, полученные из базы Мирового центра данных по морскому льду Арктического и антарктического научно-исследовательского института (<https://www.aari.ru>). Данные о приземной температуре воздуха (ПТВ) получены из архивов Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (<http://meteoro.ru>). Океанологические сведения о солёности (СПО) и температуре поверхности воды (ТПО) взяты из базы данных ЕСИМО (<http://www.esimo.ru/>). Акватория морей вокруг архипелагов была разделена на квазиоднородные районы [1]. В ходе исследования были подтверждены и оценены тенденции глобального потепления, выражающиеся в сокращении площади льда, повышении ПТВ и ТПО в изучаемом регионе. Установлено, что в период с 1995 по 2000 гг. наблюдается существенное сокращение среднегодовой ледовитости в каждом из районов вокруг ЗФИ. Особенно интенсивно этот процесс начинается в 2004 г., о чем свидетельствует периодическое полное освобождение акватории вод, омывающих арх. ЗФИ ото льда в августе-сентябре. Таким образом, были определены моменты смены ледового режима в исследуемом регионе и произведен сравнительный анализ взаимосвязей ледовитости с ТПО и ПТВ за эти периоды по многолетним среднемесячным значениям. В результате получена картина сезонной взаимосвязи процессов (изменение ледовитости, ТПО, ПТВ), которая описывается замкнутыми кривыми, имеющими признаки гистерезиса. Климатический период 1991-2020 гг. характеризует современную устойчивую тенденцию к потеплению для исследуемого региона [2], поэтому было целесообразно рассматривать как весь доступный период с данными по ледовитости, так и отдельно оценить характер современных темпов сокращения площади льда в Западном секторе Арктики. Для новой климатической нормы ВМО (1991-2020 гг.) был выполнен статистический анализ и получены тренды среднемесячных значений СПО, ТПО и ПТВ. За тридцатилетний период СПО в районе ЗФИ повысилась почти на 2 ppm, ТПО на 0.3 °C, а ПТВ более чем на 5.5 °C. Отдельно для сентября ТПО повысилась на 1 °C за 1977-2020 гг., что, возможно, является одной из причин включения механизма «положительной обратной связи», приводящего к исчезновению ледяного покрова и в другие месяцы года. Неслучайность линейных трендов подтверждена посредством расчета их статистической значимости. С целью выявления сезонной изменчивости линейные тренды ТПО и СПО оценены как для летнего, так и для зимнего периодов года. В зимние месяцы тренды имеют отрицательный знак, а в летние – положительный. Также в работе проведен корреляционный анализ между ледовитостью и такими глобальными климатическими индексами как: индекс Арктического колебания (АО), индекс Североатлантического колебания (NAO) и индекс Атлантического мультискального колебания (AMO). Значимых статистических связей установлено не было, однако обнаружена обратная связь с индексом AMO.

Работа выполнена в рамках раздела 5.1.4 «Мониторинг состояния и загрязнения природной среды, включая криосферу, в Арктическом бассейне и районах научно-исследовательского стационара “Ледовая база Мыс Баранова”, Гидрометеорологической обсерватории Тикси и Российского научного центра на архипелаге Шпицберген» (проект 5.1 НИТР Росгидромета).

Список литературы

- 1) Шапкин Б.С., Рубченя А.В., Иванов Б.В., Ревина А.Д., Богрянцев М.В. Многолетние изменения ледовитости в районе архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа // Лёд и Снег. 2021. 61 (1). С 128-136.
- 2) Карандашева Т. К., Демин В.И., Иванов Б.В., Ревина А.Д. Изменения температуры воздуха в Баренцбурге (Шпицберген) в XX - XXI вв. Обоснование введения новой климатической нормы // Российская Арктика. 2021. № 13. С. 26-39.

КЛАССЫ ЧАСТОТНЫХ СПЕКТРОВ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ЧЕРНОМ И АЗОВСКОМ МОРЯХ

Рыбалко А.Д.^{1,2}, Мысленков С.А.^{1,2,3} Архипкин В.С.¹

¹ Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, г. Москва

² Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, г. Москва

³ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, г. Москва

Ключевые слова: Ветровое волнение, частотные спектры, классификация, Черное море, Азовское море.

Черное и Азовские моря являются внутренними морями, интенсивно используемыми прибрежными странами в хозяйственной, рекреационной и военно-политической деятельности. Для обеспечения безопасной и эффективной деятельности как на море, так и в прибрежных зонах необходимы достоверные, полные и разнообразные сведения о параметрах ветрового волнения на разных временных масштабах. В Черном и Азовском морях ветровое волнение хорошо изучено в терминах интегральных параметров, таких как высота, период, длина волн и т.п. (например, [1, 2, 3]), в то время как исследований, посвящённых волновым спектрам, остается относительно немного. При этом именно спектры позволяют получать наиболее полную информацию о волнении, в том числе выделять волновые системы (собственно ветровые волны и волны зыби). Среди исследований, посвященных классификации спектров морей России, в том числе Черного и Азовского морей, стоит отметить работы [4, 5].

Цель данного исследования – определить классы волновых спектров и изучить их повторяемость в Черном и Азовском морях.

Для расчетов частотных спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях была использована спектральная волновая модель третьего поколения WAVEWATCH III (WW3). Приток энергии к волнам в модели осуществляется за счет энергии ветра, а ее диссипация – за счет обрушения волновых гребней, вследствие донного трения и обрушения волн на критических глубинах. Для генерации волн использовалась схема ST6. Для расчета нелинейных взаимодействий была использована параметрическая схема DIA. Для учета влияния придонного трения используется стандартная схема JONSWAP. Спектральное разрешение модели составляет 36 направлений, частотный диапазон σ – 36 интервалов от 0.03 до 0.84 Гц. Расчет производился на нерегулярной вычислительной сетке с пространственным разрешением 8-10 км для открытой части Черного моря, 3-5 км для открытой части Азовского моря и 200-400 м вдоль всего побережья обоих морей. В качестве входных данных о ветре использован реанализ NCEP/CFSv2. В работе используются поля ветра на высоте 10 метром, дискретность данных – 1 час. Пространственное разрешение реанализа оставляет $\sim 0,2^\circ$.

В ходе исследования для выделения классов ветрового волнения в исследуемых морях были проанализированы частотные спектры в 10 точках в пределах Черного и Азовского морей за 2020 год с шагом по времени 1 час. Выбранные точки расположены в различных районах морей, чтобы полнее представить режимы ветрового волнения. При выборе расположения точек особое внимание уделялось прибрежной зоне. Для Черного моря это точки в прибрежной зоне: 1 – район мыса малый Утриш в северо-восточной части Черного моря, 2 – район Геленджикской бухты, 3 – точка на северо-западном шельфе Черного моря, 4 – Каламитский залив, 5 – прибрежная зона у Южного берега Крыма, 6 – район близ г. Батуми; и в открытом море: 7 – глубоководная часть на юго-западе Черного моря, 8 – также глубоководная часть к югу от Крымского полуострова. Для Азовского моря это точки в: 9 – центральной части акватории и 10 – Таганрогском заливе.

Для классификации волновых спектров использовался иерархический агломеративный кластерный анализ с использованием евклидова расстояния [6]. Для объединения кластеров по

выбранным расстояниям использовался метод Уорда (метод минимальной дисперсии).

Кластерный анализ позволил выявить 27 классов спектров, характерных для разных точек исследуемых морей. Классы отличаются по количеству пиков, по частоте пика спектральной плотности, а также по значению максимума спектральной плотности. Наиболее многочисленными – 1-3 классы, так как к ним отнесены спектры с максимумом спектральной плотности до $0.4 \text{ м}^2/\text{Гц}$. Эти классы обусловлены действием ветра $< 5 \text{ м/с}$ и/или малой глубиной и ограниченным разгоном. Спектры в 5-12 классах формируются ветром до 10 м/с , либо более сильными ветрами, но на малых глубинах. Самые малочисленные классы – 24 и 25, формирующиеся при продолжительном ветре со скоростями более $15\text{-}20 \text{ м/с}$. Максимумом спектральной плотности в этих классах составляет более $25 \text{ м}^2/\text{Гц}$. Отдельно выделены классы со спектрами с двумя и более пиками спектральной плотности (классы 26 и 27), что свидетельствует о наличии нескольких волновых систем. Такие классы интересны для анализа, несмотря на свою малочисленность относительно других классов.

В результате, многолетние модельные расчеты частотных спектров в Черном и Азовском морях были распределены между эталонными классами, выделенными на предыдущем шаге исследования. Таким образом, были определены повторяемость, пространственная и временная изменчивость классов. Как и ожидалось, в Азовском море наблюдается значительно меньше выделенных классов, чем в любом из рассмотренных районов Черного моря. Внутригодовая изменчивость повторяемости и пространственного распределения классов больше, чем межгодовая.

Работа выполнена в рамках Госзадания № FMWE-2022-0002 и при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-55-46007.

Список литературы

- 1) Gippius F. N., Myslenkov S. A. Black Sea wind wave climate with a focus on coastal regions //Ocean Engineering. – 2020. – V. 218. – P. 108-199
- 2) Akpınar A., Bingölbali B., Van Vledder G. P. Wind and wave characteristics in the Black Sea based on the SWAN wave model forced with the CFSR winds //Ocean Engineering. – 2016. – V. 126. – P. 276-298
- 3) Дивинский Б. В., Косьян Р. Д., Фомин В. В. Климатические поля морских течений и ветрового волнения Азовского моря //Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 501. – №. 1. – С. 94-107
- 4) Бухановский А. В., Лопатухин Л. И. Спектральный волновой климат морей I. История исследования, постановка задачи, входные данные //Процессы в геосредах. – 2016. – №. 9. – С. 297-303
- 5) Бухановский А. В., Лопатухин Л. И., Чернышёва Е. С. Климатические спектры ветрового волнения, включая экстремальные ситуации //Океанология. – 2013. – Т. 53. – №. 3. – С. 304-304
- 6) Everitt, B. S. Cluster Analysis. – Heinemann, London, 1974

РЕГИОНАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ СПУТНИКОВОЙ СОЛЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА ДЛЯ МОРЕЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Криницкий М.А.^{1,2}, Савин А.С.², Осадчиев А.А.^{1,2}

¹Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Московский физико-технический институт, г. Москва

Ключевые слова: поверхностная соленость океана, машинное обучение, SMAP, речные плюмы, Арктика.

Соленость морской воды является одной из важнейших характеристик Мирового океана. До недавнего времени основным методом получения информации о поле солености были натурные измерения, производимые с помощью гидрологических зондов. В наши дни активно развиваются спутниковые методы измерения поверхностной солености океана (ПСО). В настоящее время для этих целей используются данные, получаемые спутниками SMOS (с 2009 года), Aquarius (с 2011 года) и SMAP (с 2015 года). Установленные на борту этих спутников пассивные микроволновые радиометры, работающие в L-диапазоне (1.4 ГГц), позволяют восстанавливать значения ПСО по данным спутниковых измерений микроволнового излучения, исходящего от поверхности моря.

Стандартные численные алгоритмы, используемые для восстановления значений ПСО по данным микроволнового излучения, разработаны и верифицированы (с точностью до 0.1 епс) для наиболее типичных диапазонов температуры и солености Мирового океана. При этом стандартные алгоритмы имеют гораздо более низкую точность (более 1 епс) при восстановлении солености в Северном Ледовитом океане, характеризующемся низкими температурами (менее 5-10 °С) [1]. Еще большие ошибки (более 2-3 епс) стандартных алгоритмов наблюдаются в шельфовых районах Северного Ледовитого океана, находящихся под воздействием значительного речного стока. В этих акваториях негативное влияние низких температур на точность алгоритмов усугубляется ошибками из-за низкой солености (менее 25 епс) поверхности моря.

Целью настоящей работы является разработка регионального алгоритма восстановления спутниковой солености для данных SMAP для морей российской Арктики на основе методов машинного обучения. Обучение и верификация алгоритмов проводится по данным натурных измерений солености, полученным в многочисленных экспедициях с 2015 по 2021 год в Баренцевом, Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском морях. В работе применяются и анализируются такие модели машинного обучения, как случайные леса (RF), метод опорных векторов (SVM), градиентный бустинг над решающими деревьями (GB), а также искусственная нейронная сеть (ANN). В качестве опорной модели используется многомерная линейная регрессия (LR). Входными переменными для указанных моделей машинного обучения берутся данные ПСО, полученные стандартным алгоритмом SMAP, значения радиояркостной температуры, измеренные спутниковыми микроволновыми радиометрами, концентрация морского льда, скорость и направление приповерхностного ветра, а также другие характеристики, регистрируемые спутниковыми приборами или поставляемые другими источниками синхронно спутниковым измерениям. Результаты работы алгоритмов машинного обучения сравниваются с натурными данными по принципу временной и пространственной близости измерений. Вследствие существенно неравномерного распределения измеренных значений солености в интервале от ~ 0.5 до ~ 35 епс в массиве натурных наблюдений разрабатываемые алгоритмы отдельно применяются к разным классам значений солености ($S < 12$, $12 < S < 24$, $24 < S < 29$, $29 < S$).

В результате работы были выявлены модели машинного обучения, наиболее подходящие для восстановления значения ПСО в зависимости от класса солености. Была исследована зависимость целевой переменной от входных признаков; оценено влияние разницы по времени и по пространству между спутниковыми и натурными измерениями на точность разработанных алгоритмов.

Кроме этого, было исследовано влияние граничных значений целевой переменной при использовании весовых коэффициентов модели и других характеристик используемых данных на качество восстановления ПСО.

Использование алгоритмов машинного обучения позволило существенно улучшить точность определения ПСО в морях российской Арктики по сравнению со стандартными продуктами SMAP. Предлагаемый подход можно использовать для улучшения стандартного продукта SMAP и создания региональных алгоритмов для других районов Мирового океана, находящихся под сильным влиянием речного стока [2].

Список литературы

- 1) Alexandre Supply, Jacqueline Boutin, Jean-Luc Vergely, Nicolas N. Kolodziejczyk, Gilles Reverdin, et al.. New insights into SMOS sea surface salinity retrievals in the Arctic Ocean. *Remote Sensing of Environment*, 2020, vol. 249, pp.112027.
- 2) Jang, E., Y. J. Kim, J. Im, and Y.-G. Park, 2021: Improvement of SMAP sea surface salinity in river-dominated oceans using machine learning approaches. *GIScience & Remote Sensing*, 2021, vol. 58, pp. 138-160.

КОРОТКОПЕРИОДНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ В ОБЛАСТИ СТОКОВОЙ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ КАРСКОГО МОРЯ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД 2019 ГОДА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Свергун Е.И., Коник А.А., Зимин А.В.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, Стоковая фронтальная зона, Карское море, поверхностных опресненный слой.

Юго-восточные и центральные районы Карского моря находятся под значительным влиянием материкового стока, который формирует поверхностный опресненный слой (ПОС), вносящий существенный вклад в изменчивость гидрологической структуры вод всего моря. На границе между ПОС и более холодными карскими водами формируется Стоковая фронтальная зона (СФЗ) [1, 2], являющаяся внешней границей ПОС и характеризующаяся значительной неустойчивостью.

В результате взаимодействия нестационарных фронтальных зон с мелко залегающим пикноклином, могут формироваться короткопериодные внутренние волны (КВВ) [3, 4], которые усиливают вертикальное перемешивание. То есть обилие или отсутствие КВВ может отражать интенсивность процессов обмена вод на различных участках фронтальной зоны. Связь короткопериодных внутренних волн и фронтальной динамики ранее изучалась в Карском море для летнего периода 2007 года [5]. В данной работе для летнего периода 2019 года с использованием современных спутниковых данных Sentinel-1 производится анализ проявлений КВВ в области Стоковой фронтальной зоны Карского моря, выделенной на основе кластерного анализа массива разнородных спутниковых продуктов. Применение современных спутниковых данных для регистрации проявлений КВВ, а также оригинальной методики выделения СФЗ, позволит более детально изучить особенности КВВ в области СФЗ в современных климатических условиях.

Для определения пространственно-временной изменчивости и количественных оценок СФЗ были использованы осредненные за 8 дней спутниковые измерения температуры, солёности и уровня моря в августе и сентябре 2019 года. Для идентификации термических характеристик СФЗ использовались данные температуры поверхности моря (ТПМ) инфракрасных радиометров высокого разрешения MODIS Aqua и Suomi NPP VIIRS с пространственным шагом $0,05^\circ$ по широте и долготе. С помощью радиометрических данных NASA SMAP с пространственным разрешением $0,25^\circ$ по широте и долготе определялись характеристики солёности поверхности моря внутри СФЗ. Для анализа колебаний уровня в области СФЗ использовались данные абсолютной динамической топографии продукта AVISO с пространственным разрешением $0,25^\circ$ по широте и долготе.

Идентификация СФЗ на поверхности Карского моря выполнялась с помощью оригинальной методики, представленной в работе [2]. Для определения характеристик поверхностных проявлений КВВ на акватории Карского моря использовалось 139 изображений Sentinel 1 (A, B) в S-диапазоне с режимом съёмки EW с разрешением 40 метров, охватывающих период с 1 августа 2019 года по 30 сентября 2019 года. Для поверхностных проявлений КВВ в ПО ESA SNAP и ПО Matlab определялись: положение проявления, длина волны, длина дуги лидирующего гребня в пакете, направление распространения, количество волн в пакете. Для анализа условий отображения КВВ на морской поверхности, привлекались 6-часовые данные о скорости приводного ветра с пространственным разрешением $1/4^\circ$ продукта MERCATOR.

В общей сложности за август-сентябрь 2019 года на акватории Карского моря зарегистрировано 471 проявление пакетов КВВ с количеством волн в пакете от 2 до 16 (в среднем 4) с длиной волны от 200 до 3000 метров при среднем значении в 600 метров. Длина лидирующего гребня

в пакетах варьируется от 3 до 82 км, в среднем составляя 10 км. Наибольшее число волн регистрируется во вторую декаду сентября. Распределение проявлений по акватории неравномерно: они концентрируются у мыса Желания, над Новоземельской впадиной, около острова Ушакова. Наибольшая частота встречаемости проявлений наблюдается у мыса Желания. Выявлено, что проявления КВВ часто регистрируются даже при значительных скоростях ветра (до 10 м/с).

Анализ композитных карт проявлений КВВ и Стоковой фронтальной зоны показал, что в августе в области СФЗ регистрируется 18% от всех зарегистрированных за месяц проявлений. В сентябре в области СФЗ регистрируется 40% от общего числа проявлений. Разница количества проявлений КВВ между месяцами, возможно, связана с увеличением площади СФЗ в сентябре, а также большей устойчивостью пикноклина в области СФЗ, что подтверждается аномально высокими градиентами ТПМ. Анализ положений СФЗ выявил ее нестационарность на акватории Карского моря. Согласно [4], источником генерации КВВ могут являться движущиеся или подверженные инерционным колебаниям фронтальные зоны в присутствии мелкого обостренного пикноклина. То есть данный механизм может играть значительную роль в генерации КВВ в отдельных районах Карском море. Дополнительным подтверждением вклада именно этого механизма генерации волн могут служить особенности их проявлений на спутниковых снимках в области СФЗ: большая кривизна лидирующих гребней и отсутствие генерального направления распространения проявлений КВВ.

Исследование выполнено в рамках государственного задания №FMWE-2021-0014.

Список литературы

- 1) Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 296 с.
- 2) Коник, А.А. Оценка изменчивости характеристик Стоковой фронтальной зоны Карского моря на основе комплексирования данных спутникового дистанционного зондирования / А. А. Коник, А. В. Зимин, О. А. Атаджанова, А. П. Педченко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 241-250. DOI 10.21046/2070-7401-2021-18-2-241-250
- 3) Романенков, Д.А. Изменчивость фронтальных разделов и особенности мезомасштабной динамики вод Белого моря / Д.А. Романенков, А.В. Зимин, А.А. Родионов, О.А. Атаджанова, И.Е. Козлов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9. № 1. С. 59-72.
- 4) Лаврова, О. Ю., Возможные механизмы генерации внутренних волн в северо-восточной части Черного моря / О.Ю. Лаврова, М.И. Митягина, К.Д. Сабинин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т.2. №5. С. 128—136
- 5) Свергун, Е. И., Зимин, А. В., Атаджанова, О. А., Коник, А.А., Зубкова, Е.В., Козлов, И.Е. Изменчивость фронтальных разделов и короткопериодные внутренние волны в Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых наблюдений за тёплый период 2007 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 181-188. DOI 10.21046/2070-7401-2018-15-4-181-188

СОЛНЕЧНОЕ ТРОПИЧЕСКОЕ НЕРАВЕНСТВО ПРИЛИВОВ КАК ОДНА ИЗ ПРИЧИН СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В КУРИЛО-КАМЧАТСКОМ РЕГИОНЕ

Свергун Е.И., Софьина Е.В., Зимин А.В.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, внутренние приливные волны, сезонная изменчивость, солнечное тропическое неравенство, массовая приливная сила, Курило-Камчатский регион, хребет Витязь.

Курило-Камчатский регион Тихого океана отличается сложным рельефом дна, где выделяют узкий шельф, ширина которого в среднем составляет около 30 км, крутой материковый склон со средним уклоном дна около 60 м/км, вдоль всего региона на юго-восток от материкового склона простирается Курило-Камчатский желоб с глубинами более 6 км. Под влиянием баротропных приливных волн Тихого океана в Курило-Камчатском регионе формируется выраженная приливная динамика [1] с доминированием суточного прилива на большей части акватории. Взаимодействие баротропных приливных волн с крутым материковым склоном приводит к генерации внутренних приливных волн (ВПВ), амплитуда которых варьируется от 30 до 120 м [2]. Поскольку Курило-Камчатский регион расположен севернее критической широты для суточных приливных гармоник, ВПВ являются субинерциальными (имеют частоту меньше инерционной) и не могут распространяться как свободные волны от мест генерации. В этом случае суточные ВПВ являются захваченными, и их диссипация происходит в окрестности мест генерации. При сочетании определенных условий (наклон дна, стратификация и скорость приливного течения) ВПВ могут дезинтегрироваться в пакеты короткопериодных внутренних волн (КВВ) с периодами порядка десятков минут, длинами порядка сотен метров и скоростью распространения около 0,5 м/с.

Обобщение архива современных спутниковых данных Sentinel-1 с декабря 2018 года по ноябрь 2019 года [3] продемонстрировало повсеместное присутствие проявлений КВВ от Южных Курил до северной части полуострова Камчатка. Было установлено, что районы частой встречаемости проявлений КВВ совпадают очагами генерации суточных субинерциальных ВПВ, что может указывать на генерацию КВВ при дезинтеграции суточных ВПВ. Также была выявлена значительная внутригодовая изменчивость характеристик проявлений КВВ, которая связывалась с изменчивостью стратификации и метеорологических условий (скоростью ветра). Однако известно, что амплитуда суточного солнечного прилива максимальна, когда Солнце имеет наибольшее южное или северное склонение, и минимальна, когда Солнце находится в плоскости экватора. Таким образом, период солнечного тропического неравенства составляет половину тропического года. Летом в июне и зимой в декабре наблюдаются максимальные тропические приливы, а в марте и сентябре – равноденственные солнечные приливы. Солнечное тропическое неравенство приливов можно представить комбинацией суточных приливных гармоник K_1 и P_1 .

Целью данной работы было оценить влияние солнечного тропического неравенства приливов на генерацию ВПВ и внутригодовую изменчивость характеристик КВВ в Курило-Камчатском регионе.

Регистрация поверхностных проявлений КВВ осуществлялась на радиолокационных изображениях (РЛИ) Sentinel-1A/B в С-диапазоне и режиме съемки IW с разрешением 25 метров и шириной полосы обзора 250 км. Всего для периода с 1 декабря 2018 года по 30 ноября 2019 года было использовано 827 РЛИ, которые выбирались с использованием сервиса Европейского космического агентства Copernicus Open Access Hub.

Для всего рассматриваемого периода были рассчитаны ежедневные значения массовой приливной силы плавучести (“tidal body force”) [4], как критерия интенсивности генерации ВПВ, для гармоник K_1 и P_1 с использованием приливного атласа TPXO9 [5], реанализа системы MERCATOR (<https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/>).

За исследуемый период было детектировано 1876 проявлений КВВ. Количество зарегистрированных проявлений сильно варьирует в течение года: минимальное число проявлений регистрируется с января по март, а максимум наблюдается с июля по сентябрь. Летом регистрируется в 20 раз больше проявлений, чем зимой. Изменчивость геометрических характеристик проявлений КВВ от сезона к сезону менее ярко выражена по сравнению с изменчивостью количества проявлений. Наиболее часто в течение всего года проявления КВВ регистрировались южнее острова Кунашир, в районе острова Онекотан над хребтом Витязь, около м. Шипунский, а также в Камчатском заливе.

Чтобы выяснить причины значительной изменчивости проявлений КВВ в течение года, был проведен анализ хода количества проявлений КВВ и интегрированной по глубине среднесуточной массовой приливной силы плавучести для субинерциальных гармоник K_1 и P_1 , в районе над хребтом Витязь, где в летний период была зарегистрирована максимальная частота встречаемости проявлений КВВ. В период с декабря 2018 года по март 2019 года было зарегистрировано всего 4 проявления КВВ в выбранной области. Начиная с апреля количество проявлений КВВ постепенно увеличивается, достигая максимума около 50 проявлений в первой половине августа. Со второй половины августа по конец сентября количество проявлений КВВ уменьшается до локального минимума в 5 проявлений. Начиная с октября число зарегистрированных проявлений снова начинает расти. Сравнивая годовой ход количества проявлений КВВ и массовой приливной силы плавучести комбинации гармоник K_1 - P_1 , можно видеть, что их отдельные минимумы и максимумы совпадают. Из чего можно сделать вывод, что полугодовая изменчивость массовой приливной силы плавучести может вносить вклад в сезонную изменчивость генерации КВВ.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 23-17-00174.

Список литературы

- 1) Богданов К.Т., Мороз В.В. Структура, динамика и гидролого-акустические характеристики вод проливов Курильской гряды. Владивосток: Дальнаука, 2000. 152 с.
- 2) Tanaka, Y., I.Yasuda, S.Osafune, T.Tanakab, J.Nishiokad, and Y. N.Volkove. Internal tides and turbulent mixing observed in Bussol Strait // Prog. Oceanogr., 2014. V. 126. P.98-108
- 3) Свергун, Е.И. Короткопериодные внутренние волны в шельфовых районах с интенсивной приливной динамикой / Е. И. Свергун, А. В. Зимин, Д. А. Романенков, Е. В. Софьина // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 6. С. 690-705. DOI 10.31857/S0002351522060165
- 4) Baines, P.G. On internal tide generation models // Deep Sea Res. Part A. 1982 V.29 (3) P. 307–338. doi: 10.1016/0198-0149(82)90098-X
- 5) Egbert, G. D., and S. Y. Erofeeva. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // J. Oceanic Atmos. Technol. V. 19. P. 183 – 204. doi:10.1175/1520-0426(2002)0192.0.CO;2

ИЗМЕНЕНИЕ МАССЫ И ВЫСОТЫ ЛЕДНИКА ГРЕНЛАНДИИ

Семенихина А.Ю., Подрезова Н.А.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: ледник, Гренландия, Арктика.

Ледник Гренландии – второй по размеру ледяной щит в мире после Антарктического. Ледник расположен в центре острова, но в некоторых районах его граница выходит на побережье. У побережья также расположены изолированные ледники. В связи с потеплением климата ледник Гренландии тает и уменьшается в размерах. Согласно данным ученых объём ледника оценивают в 2,93 млн. кубических километров [1]. Потеря льда с Гренландского ледяного щита является одним из крупнейших источников современного повышения уровня моря. Уменьшение льда происходит за счет увеличения поверхностного стока талых вод, а также таяния прибрежной части ледника [2].

В работе рассматривается изменение массы и высоты ледника Гренландии в период с 2002 по 2021 год. Исходными данными послужили ежегодные значения высоты и массы ледника Гренландии за исследуемый период, полученные со спутников NASA (twin Gravity Recovery and Climate Experiment – GRACE) [3].

В период с 2018 по 2020 год в западной части Гренландии наблюдалось интенсивное уменьшение высоты ледового покрова, в среднем на 1,5-2 метра в год. В центральной части также происходило уменьшение, но оно было не столь значительным, до 0,5 метров. На северо-восточном и юго-восточном побережьях наблюдалась обратная тенденция, происходило увеличение высоты ледника – доходящее до 2 метров в год.

В течение наблюдаемого периода происходило постепенное уменьшение массы ледника, наибольшие изменения при этом происходили в прибрежных областях острова. Начиная с августа 2009 года на юго-западном побережье динамика уменьшения массы начала достигать до 7 метров эквивалентов воды, впервые от начала проведения измерений в апреле 2002 года. В сентябре 2011 года на юго-западном побережье таяние стало достигать 10 метров эквивалентов воды, а начиная с ноября 2014 года подобная тенденция начала наблюдаться и на юго-восточном побережье. С января 2015 года динамика уменьшения массы ледника распространилась по всему западному побережью. В январе 2017 года в северной части Гренландии уменьшение массы начало доходить до отметки 6 метров эквивалентов воды. К концу проведения измерений в августе 2021 года по всему западному побережью, а также в северной и юго-восточной частях острова потери массы составляли до 10 метров эквивалентов воды.

В целом, можно отметить, что потеря массы ледника Гренландии за период с 2002 по 2021 год составила более 4500 Гт, а повышение уровня Мирового океана – 1,2 см.

Список литературы

- 1) Bamber J.L., Layberry R.L., Gogineni S.P. A new ice thickness and bed data set for the Greenland Ice Sheet // Journal of Geophysical Research Atmospheres. 2001, vol. 106, pp. 33773-33780.
- 2) Vox J.E., Hubbard A., Bahr D.B. Greenland ice sheet climate disequilibrium and committed sea-level rise // Journal of Nature Climate Change. 2022, vol. 12, pp. 808- 813.
- 3) Polar Portal. Monitoring Ice and Climate in the Arctic. [Электронный ресурс] – режим доступа URL:<http://polarportal.dk/en/greenland/> (дата обращения: 10.01.2023)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДВОДНОГО ЗВУКОВОГО КАНАЛА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

Семиделова А.О., Подрезова Н.А.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: скорость звука в воде, подводный звуковой канал, Баренцево море, Арктика.

Баренцево море - окраинное море Северного Ледовитого океана. Ограничено северным побережьем Европы и архипелагами Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Новая Земля. Юго-западная часть моря зимой не замерзает из-за влияния Северо-Атлантического течения. На гидрологические процессы, происходящие в Баренцевом море, оказывают значительное влияние теплые воды одного из ответвлений Гольфстрима - Нордкапского течения.

В настоящее время акустическая гидролокация широко используется в различных отраслях - в промысловой разведке рыбы и при определении ее запасов, в акустической томографии, в геологических изысканиях для определения строения дна и т.д. На практике в море при распространении звука возникают многочисленные сложные явления, появляющиеся вследствие неоднородности водной среды. Большое воздействие на распространение звука в природных водоемах оказывают границы раздела и дно водоема, гидростатическое давление, температурная и солевая неоднородность. В связи, с чем исследование распространения скорости звука в море всегда является актуальной задачей.

В работе исследуется пространственная изменчивость профиля скорости звука в воде. Исходными данными послужили экспедиционные данные по температуре и солености за летний период 2022. Для расчета скорости звука в воде использовалась формула Вильсона. На акватории Баренцева моря было выбрано 9 станций, по которым велись расчеты - первые 2 станции находились между о.Визе и Землей Франца-Иосифа, 3 - 4 станции находились между Новой Землей и Землей Франца-Иосифа, 5 - 6 станции находились между Землей Франца-Иосифа и Шпицбергенем и станции 7 - 9 в открытой части Баренцева моря.

На станциях номер 1 и 2 наблюдения показали что до глубины 50 м отмечаются отрицательные значения температуры до -1°C и наименьшие значения солености $32,5\text{‰}$. На глубине 200 м можно отметить максимальные значения температуры около 2°C , значения соленость около $35,7\text{‰}$. При дальнейшем увеличении глубины температура уменьшается до отрицательных значений, соленость не меняется и остается в пределах $35,7 - 35,8\text{‰}$. Минимальная скорость звука в воде наблюдается на глубине 30 м и равна $1440 - 1444\text{ м/с}$.

На станциях 3 и 4 в целом температура уменьшается от 3 до $-1,3^{\circ}\text{C}$ от поверхности до глубины 30 м. Далее, до глубины 150 м температура возрастает до значений $0,5^{\circ}\text{C}$. При дальнейшем уменьшении глубины температура варьирует от 0 до 1°C . Соленость на поверхности имеет минимальное значение равное 33‰ . При увеличении глубины соленость возрастает до значений $35,7\text{‰}$. Минимальное значение скорости звука в воде 1443 м/с наблюдается на глубине 30 м.

На станциях с 5 по 6 максимальное значение температуры 8°C отмечается на глубине 50 м. От поверхности до глубины 30 м значения температуры меняются от 0 до 1°C . С глубины 100 м до дна температура варьирует от 0 до $-1,5^{\circ}\text{C}$. Минимальное значение солености наблюдается на поверхности и составляет $34,3\text{‰}$. С увеличением глубины соленость возрастает до $35,6\text{‰}$. Скорость звука на глубине 30 м равна 1450 м/с , далее до глубины 50 м скорость звука возрастает до значения 1482 м/с . С глубины 100 м скорость звука меняется не значительно в пределах $1449 - 1452\text{ м/с}$.

На станциях 7 и 9 максимальные значения температуры около 9°C наблюдаются на поверхности. С увеличением глубины температура уменьшается до значений -1°C . Минимальное значение

солености 33 ‰ отмечается на поверхности. До глубины 100 м соленость увеличивается до значений 35,5 ‰, при дальнейшем увеличении глубины соленость остается неизменной. Минимальное значение скорости звука 1452 м/с отмечается на глубине 350 м.

В воде скорость звука возрастает при увеличении гидрологических параметров, таких как соленость, давление и температура. За счет небольшой глубины Баренцева моря на скорость звука оказывает сильное влияние температура воды. Полученные профили скорости звука и температуры на всех станциях имеют схожие очертания. Самое максимальное значение скорости звука в 1488 м/с отмечалось на станциях номер 1 и 9 на глубинах 10 и 100 м соответственно. Самое минимальное значение скорости звука в 1442 м/с отмечалось на станции номер 3 на глубине 20 м.

КРАТКОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОД АРКТИКИ В РЕЙСЕ ПЛАВУЧЕГО УНИВЕРСИТЕТА ИОРАН В 2021 ГОДУ

Сильвестрова К.П.¹, Мехова О.С.^{1,2}, Круглова Е.Е.^{1,3}, Мысленков С.А.^{1,3}, Осадчиев А.А.¹, Степанова Н.Б.^{1,4}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Санкт-Петербургский Государственный Университет, г. Санкт-Петербург

³Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

⁴Московский физико-технический институт, г. Москва

Ключевые слова: температура воды, термокоса, измерения in-situ, Арктика.

В экспедиционных гидрофизических работах часто используются данные вертикального распределения температуры. Такие данные наряду с измерениями солености служат основой для выбора горизонтов при отборе проб для химических и биологических исследований, а также как самостоятельные измерения для изучения структуры вод, внутренних волн, апвеллингов, перемешивания и др. Как правило, данные о температуре воды получают при помощи зондирования – т.е. постепенного плавного погружения измерителя (CTD-зонда или другого прибора). Существуют и другие способы измерения температуры: одновременно на нескольких горизонтах при помощи термисторов, распределенных на разных глубинах, либо при помощи непрерывной термопрофилирующей косы.

В 2021-м году с борта НИС «Академик Иоффе» в рейсе Плавучего университета ИО РАН [1] проведены кратковременные измерения профиля температуры воды различными приборами. Параметры пакета внутренних волн, зафиксированного в проливе Карские ворота по данным термопрофилирующей косы TRArctic, разработанной в МГИ и имеющей непрерывный измерительный кабель, приведены в [2].

В данном исследовании представлены первичные данные термокос с распределенными по фалу с шагом 2 м автономными регистраторами температуры (Starmon mini производства Star-Oddi). Также на фалах были закреплены датчики давления (DST centi-TD Star-Oddi) в поверхностном и промежуточном слое, в зависимости от станции. Автономные регистраторы имеют точность измерения температуры 0.025°C или $\pm 0.1^\circ\text{C}$ и давления $\pm 0.4\%$ от диапазона (10/20 бар). Дискретность измерений 1-2 секунды. В исследовании использовались либо 2 отдельных термокосы (по 10-11 датчиков), размещенных в районе носовой лебедки и шкафута, либо одна (21 датчик). Сверху в зависимости от положения термоклина, определяемого по данным зонда, размещалась поверхностная плавучесть, на конец фала прикреплялся груз.

В ходе экспедиции измерения термокосами проводились на 38 станциях, на разных полигонах: Карские ворота, устье р. Пясины, желоб Святой Анны. Длительность одного измерения составляла ~30-40 минут. На некоторых станциях запуски проводились по несколько раз, общее время работы термокос составило более 16 часов.

Исследования короткопериодной изменчивости температуры воды, а также внутренних волн редко проводятся в комплексных экспедициях, особенно в арктических широтах, а опубликованные в [2] результаты относятся только к району пролива Карские ворота. Внутренние волны в океанах и морях в существенной мере определяют изменчивость толщи водной среды в широких диапазонах пространственных и временных масштабов, оказывают значительное влияние на вертикальную стратификацию вод, турбулентное перемешивание, распределение взвесей, вертикальные миграции планктона и рыб, способствуют перемешиванию вод. Таким образом, исследования внутренних волн имеют определяющее значение для понимания различных процессов в морях, что и определяет актуальность данной работы.

Цель исследования оценить изменчивость термической структуры вод на малых временных масштабах, которая может оказывать влияние при проведении комплексных экспедиционных исследований, а также описать параметры зафиксированных колебаний.

В результате анализа данных термокос получены оценки репрезентативности стандартных STD профилей зондирующего комплекса при разных гидрофизических условиях, получены данные о термической структуре вод в поверхностном слое и зафиксированы внутренние волны. Так, например, в желобе Святой Анны вертикальное смещение термоклина может достигать 3-5 м, изменчивость температуры в течение станции составила $0.1-1^{\circ}\text{C}$ в зависимости от горизонта, наблюдались изменения формы профиля температуры. Также были зафиксированы колебания с периодом $\sim 2-3$ минуты, что соответствует периоду внутренних волн.

Благодарности: данные получены в ходе измерений в 58-ой экспедиции ПС «Академик Иоффе» в Карское море по программе Плавучий университет МФТИ и ИО РАН.

Данные получены в рамках программы Плавучие университеты при поддержке Министерства науки и высшего образования. Обработка данных выполнена в рамках темы № FMWE-2021-0002 государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

Список литературы

- 1) Osadchiev Alexander, Viting Kirill, Frey Dmitry, Demeshko Darya, Dzhamalova Alina, Nurlibaeva Alina, Gordey Alexandra, Krechik Viktor, Spivak Eduard, Semiletov Igor, Stepanova Natalia Structure and Circulation of Atlantic Water Masses in the St. Anna Trough in the Kara Sea // *Frontiers in Marine Science*. . 2022. 9. 10.3389/fmars.2022.915674.
- 2) Копышов И. О., Козлов И. Е., Фрей Д. И. и др. Исследование короткопериодных внутренних волн в проливе Карские ворота в летний период по данным *in situ* // *Моря России: Вызовы отечественной науки. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции, Севастополь, 26–30 сентября 2022 года.*

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОРОСТИ ПОТОКА АНТАРКТИЧЕСКОЙ ДОННОЙ ВОДЫ В АБИССАЛЬНОМ КАНАЛЕ ВИМА

Смирнова Д.А.^{1,2}, Фрей Д.И.^{1,3}, Медведев И.П.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва

³Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

Ключевые слова: канал Вима, изменчивость скорости потока, Антарктическая донная вода, спектральный ротарный анализ, инерционные колебания, приливы.

Антарктическая донная вода (ААДВ) — одно из важных звеньев в атлантической термохалинной циркуляции. Она формируется в море Уэдделла при смешении холодной плотной воды антарктического шельфа и более теплой соленой Циркумполярной глубинной воды [1]. Понимание особенностей распространения этой водной массы и объема ее переноса в разных частях океана влияют на оценку меридионального переноса тепла. Циркуляция Антарктической донной воды в силу ее плотности определяется топографией дна океана. Глубоководный канал Вима (30° ю. ш. 39° з. д.), пересекающий возвышенность Рио-Гранде, соединяет Аргентинскую и Бразильскую абиссальные котловины. Через него ААДВ распространяется в Центральную и Северную Атлантику. Начиная с 30-х гг. XX в., в канале было проведено большое количество измерений, в том числе измерения термохалинной структуры (CTD-измерения) и скоростного режима (ADCP-измерения) потока антарктических вод [2,3]. Однако только стационарные в пространстве временные ряды с автономных заякоренных буйковых станций дают наиболее полное представление об изменчивости потока Антарктической донной воды.

Для анализа были использованы данные с 12-ти заякоренных станций, установленных в разных частях канала Вима с 1979 по 1981 гг., с 1991 по 1992 гг. и с 2003 по 2007 гг. Продолжительность измерений на этих станциях составляла от 4 до 23 месяцев. Датчики были установлены на горизонтах от 470 до 4625 м, что позволило сделать выводы о вертикальной изменчивости скорости течений. В основе ротарного спектрального анализа, использованного для обработки этих данных, лежит разложение вектора скорости течений на правовращательную (по часовой стрелке) и левовращательную (против часовой стрелки) составляющие [4]. Этот метод наглядно показывает особенности горизонтальных движений, таких как приливы или инерционные колебания.

В результате анализа временных рядов были выделены периодические составляющие, влияющих на временную изменчивость потока Антарктической донной воды, описаны свойства их пространственного и вертикального распределений с учетом топографии дна канала Вима. Основные компоненты — это приливы, инерционные движения, низко- и высокочастотные изменения скорости. Преобладание полусуточных приливных гармоник, а именно лунной гармоники M_2 , над всеми остальными отражается в виде яркого узкого энергетического пика, постоянного во всей толще. Они зафиксированы всеми датчиками. Еще один значительный максимум энергии имеет частоту около 1 цикла/сутки. Он представляет из себя результирующую взаимодействия суточных приливов и инерционных колебаний с периодом 23.3 ч на широте 31° ю. ш. В связи с этим проанализировать эти компоненты изменчивости скорости потока по отдельности не удалось. Тем не менее, наличие энергетического пика с периодом 1 сутки движений против часовой стрелки говорит о том, что в канале Вима инерционные движения направлены против часовой стрелки. Это наблюдение согласуется с теоретическими представлениями [4] и натурными измерениями в других районах Мирового океана [5]. Ослабление описанного энергетического максимума с глубиной отражает ослабление инерционных движений в русле канала, в то время как над его склонами они остаются значительными. Изменения с частотой больше инерционной были названы высокочастотными. Результат статистического анализа показал, что их средние скорости сопоставимы

со скоростями приливов, однако спектры показали, что вклад приливных движений по энергии намного превышает высокочастотные. Изменчивость с частотой менее 1 цикла/сутки была определена как низкочастотная. По спектрам были выделены некоторые пики с периодами от 2 до 14 дней. По значениям средней кинетической энергии и по скоростям течений низкочастотная изменчивость скоростей преобладает во всем исследуемом регионе.

Помимо основных составляющих изменчивости скорости потока ААДВ на спектрах были зафиксированы колебания fM_2 , впервые описанные в [6] для Тихого океана. Они образуются в результате сложного взаимодействия внутренних приливов, сгенерированных под влиянием топографии дна, и инерционных движений. В канале Вима колебания с частотой fM_2 зафиксированы на всех горизонтах, где наблюдается значительный вклад инерционных колебаний, что говорит об их прямой связи, вне зависимости от местоположения заякоренных станций. В связи с тем, что они наблюдались в разных частях Мирового океана вдали от берега на глубинах более 2000 м, вероятно, эти движения играют важную роль в перераспределении энергии в открытом океане [6].

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-77-10004.

Список литературы

- 1) Morozov E.G., Tarakanov R.Y., Frey D.I. Bottom Gravity Currents and Overflows in Deep Channels of the Atlantic Ocean Observations, Analysis, and Modeling // Springer Nature. 2021.
- 2) Zenk W., Speer K.G., Hogg N.G. Bathymetry at the Vema Sill // Deep Sea Research №40. 1993. P. 1925-1933
- 3) Hogg N.G., Owens W.B. Direct measurement of the deep circulation within the Brazil Basin // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography №1-2(46). 1999. P. 335-353 [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(98\)00097-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(98)00097-6)
- 4) Thomson R.E., Emery W.J. Data analysis methods in physical oceanography // Newnes. 2014.
- 5) Liao G., Zhou B., Liang C., Zhou H., Ding T. et al. Moored observation of abyssal flow and temperature near a hydrothermal vent on the Southwest Indian Ridge // Journal of Geophysical Research: Oceans №1(121). 2016. P. 836-860 <https://doi.org/10.1002/2015JC011053>
- 6) Mihaly S.F., Thomson R.E., Rabinovich A.B. Evidence for nonlinear interaction between internal waves of inertial and semidiurnal frequency // Geophysical Research Letters №8(25). 1998. P. 1205-1208 <https://doi.org/10.1029/98GL00722>

ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ ПЛОЩАДИ ЛЬДА КАРСКОГО МОРЯ

Степина А.А., Подrezова Н.А.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: ледовитость, Карское море, Арктика.

Карское море – окраинное море Северного Ледовитого океана. Омывает берега северо-восточной части Европы, Западной Сибири, полуострова Таймыр, архипелагов Новая Земля и Северная Земля. Имеет выход к Арктическому бассейну Северного Ледовитого океана.

В нашей стране Карское море занимает первое место по площади, равное 883 тыс.км², и имеет важное стратегическое значение. Карское море является одним из самых исследуемых северных морей, так как, помимо Северного морского пути, в данном море находится большое количество буровых платформ, а добыча нефти, в свою очередь занимает ведущую роль в нашей стране. Акватория используется также и для рыболовецкого промысла. Знание ледового режима Карского моря позволит прогнозировать ледовые условия в регионе для последующего планирования работ.

В работе исследуется межгодовая изменчивость площади льда Карского моря. Исходными данными послужили среднемесячные значения площади льда Карского моря с 1978 по 2022 года (National Centers for Environmental Information), а так же ежедневные значения температуры атмосферы – п.Диксон, г.Амдерма, м.Голомянный, м.Болванский нос, м.Стерлегова и о.Визе за тот же период (Специализированные массивы для климатических исследований) для расчета суммы градусо-дней мороза [1,2].

График среднегодовой ледовитости Карского моря показывает отрицательный тренд, сокращение льда составляет 57 тыс.км² за 10 лет. Максимальная площадь льда 784тыс.км² наблюдалась в 1981 году. Минимальная площадь льда – чуть более 445 тыс.км² наблюдалась в 2012 году. Следует отметить, что с 2003 по 2012 год площадь льда уменьшалась с 757 тыс.км² до 445 тыс.км², однако с 2015 года наблюдается некоторое колебание площади льда около среднего значения – 560 тыс.км².

Графики среднегодовых температур атмосферы на исследуемых станциях - п.Диксон, г.Амдерма, м.Голомянный, м.Болванский нос, м.Стерлегова и о.Визе, наоборот показывают положительные тренды. Наибольший положительный тренд наблюдается на о.Визе, повышение температуры там составляет 1,5°C за 10 лет. Повышение температуры на м.Голомянный составляет 1,2°C за 10 лет, на м.Стерлегова и м.Болванский нос составляет 1°C за 10 лет и в г.Амдерма 0,9°C за 10 лет.

Отметим 1998 и 2012 года. В 1998 году наблюдаются среднегодовые температуры ниже на 3 – 4°C линии тренда на всех станциях, площадь льда в этот год почти достигает максимума и составляет 777 тыс.км². В 2012 году наблюдается обратная ситуация, среднегодовые температуры выше линии тренда на 2 – 3°C на всех станциях и, как следствие, уже отмечалось выше, наблюдается минимальная площадь льда.

По данным СГДМ был произведен кластерный анализ с целью определения трех классов суровости зим (суровая, умеренная и мягкая) по всем станциям. Для п.Диксон получили следующие результаты: мягкая зима до 3300 СГДМ, умеренная зима от 3301 до 4500 СГДМ и суровая зима более 4501 СГДМ. За рассмотренный период, наблюдалось по 42% мягких и умеренных зим, 16% - суровых. Отметим, что последняя суровая зима была в 2004 году.

Список литературы

- 1) National Centers for Environmental Information [сайт]. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/> (дата обращения: 06 января 2023)

2) Библиотека климатических данных [сайт]. URL: aisori.meteo.ru (дата обращения: 06 января 2023)

БАРОТРОПНЫЙ ОТКЛИК БАРЕНЦЕВА МОРЯ НА ПОЛЯРНЫЕ ЦИКЛОНЫ

Стокоз А.К., Кудрявцев В.Н., Хворостовский К.С.

Лаборатория Спутниковой Океанографии РГГМУ, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: полярные циклоны, баротропный отклик, взаимодействие океана с атмосферой, спутниковая океанография, альтиметрия, аномалия уровня моря.

Полярные циклоны (ПЦ) – это высокоширотные интенсивные мезомасштабные атмосферные образования. Они имеют небольшие размеры до 1000 км и короткий срок жизни до трех дней, но в то же время для них характерны сильные ветра, достигающие и иногда превышающие 30 м/с [1]. В основном ПЦ развиваются в результате вторжения холодного воздуха над относительно теплой поверхностью моря. Хотя за последние десятилетия объем знаний о полярных циклонах значительно расширился, остается еще много нерешенных проблем, в том числе связанных с изучением процессов взаимодействия ПЦ с океаном.

Известно, что движущийся циклон порождает как баротропный, так и бароклинный отклики океана [2]. Природа двух составляющих различна: баротропный отклик порождается ротором напряжения ветра, а бароклинный отклик связан со стратификацией океана, при этом установлено, что обе компоненты не взаимодействуют друг с другом, и могут рассматриваться отдельно [3]. В условиях мелководного Баренцева моря вклад баротропной составляющей намного больше бароклинной [3], и должен выражаться как формирование впадины с отрицательными аномалиями уровня в следе циклона. Насколько известно, исследования аномалий уровня в следах полярных циклонов и вследствие их влияние на циркуляцию океана не велись.

В поисках аномалий уровня в следах полярных циклонов были проанализированы спутниковые альтиметрические данные аномалий уровня морской поверхности (SSHA) действующих миссий Cryosat-2, Sentinel-3 и Saral, основные характеристики ПЦ (координаты, дата, форма) получены из базы данных [4], основанной на AVHRR-изображениях. За три рассматриваемых зимних сезона 2016-2019 гг. аномалии уровня обнаружались в следах 14 из 35 полярных циклонов, перемещавшихся над акваторией Баренцева моря за исследуемый период, причём все они имели форму спирали, в отличие от остальных 21, имевших форму запятой. Амплитуда колебаний уровня морской поверхности в следах этих циклонов составляла 0.2 – 0.4 м, в некоторых случаях достигая 0.8 м. Аномалии уровня морской поверхности в следах циклонов сохранялись в течение нескольких дней после прохождения циклонов, а в некоторых случаях наблюдались даже спустя две недели.

Для дальнейшего исследования был выбран полярный циклон спиралевидной формы, перемещавшийся над Баренцевым морем с 19 по 20 января 2017 г. В течение его короткой жизни скорость перемещения циклона изменялась от 4 до 14 м/с, максимальная скорость ветра варьировалась от 20 до 27 м/с, циклон перемещался над глубинами 125 – 300 м. С момента появления циклона над акваторией Баренцева моря и в последующие 10 дней 116 спутниковых треков пересекли исследуемую область, 26 из которых пересекли траекторию циклона и зафиксировали понижение уровня в следе циклона. Из них 8 спутниковых треков пересекли след циклона в течение первых 24 часов. Так как со временем величина аномалий уровня в следе циклона уменьшается, а сам след становится менее выраженным, для дальнейшего анализа использованы отмеченные ранее 8 треков. В среднем величина аномалий уровня в следе для исследуемого циклона составила 0,15 – 0,2 м, максимальное значение 0,43 м было зафиксировано на участке, где циклон достиг максимальной скорости ветра и при этом минимальной скорости перемещения. Величина аномалии уровня в следе к тому же обратно пропорциональна глубине водоема, и увеличивается при прохождении циклона над возвышениями дна.

Для оценки баротропного отклика было произведено моделирование аномалий уровня в следе конкретного циклона посредством упрощенной модели [5], используя ежечасные поля ветра ре-

анализа ERA5. Аномалии уровня рассчитываются путем интегрирования вертикальной скорости на поверхности по времени. Результаты моделирования согласуются с наблюдениями, воспроизводя общую характеристику баротропного отклика моря на полярный циклон на количественном уровне.

Список литературы

- 1) Rasmussen E., Turner J. Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions // Cambridge University Press, 2003. 612 P.
- 2) Geisler, J. E. Linear theory of the response of a two layer ocean to a moving hurricane // Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics, 1970, vol. 1, No. 1-2, pp. 249–272
- 3) Ginis, I., & Sutyrin, G., Hurricane-generated depth-averaged currents and sea surface elevation // Journal of Physical Oceanography, 1995, vol. 25, pp. 1218–1242
- 4) Rojo, M., Claud, C., Mallet, P., Noer, G., Carleton, A. and Vicomte, M. Polar low tracks over the Nordic seas: A 14-winter climatic analysis // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 2015, vol. 67, No. 1
- 5) Kudryavtsev, V., Monzikova, A., Combot, C., Chapron, B., & Reul, N. A simplified model for the baroclinic and barotropic ocean response to moving tropical cyclones: 2. Model and simulations // Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, vol. 124, pp. 3462–3485

СУММАРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПОВЕРХНОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ В ЛЕТНИЙ И ЗИМНИЙ ПЕРИОДЫ

Сумкина А.А.^{1,2}, Кивва К.К.¹, Иванов В.В.^{2,3}

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Москва

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

³Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: тепловой баланс, изменение климата, морской лед.

Исследована пространственная изменчивость теплообмена в зимний и летний периоды над Баренцевым морем. Теплообмен на поверхности моря влияет на многие физические процессы в океане и атмосфере, в частности, определяет конвекцию в зимний период и формирование устойчивой структуры водной толщи летом [1, 5]. Ранее нами показано, что на севере, северо-востоке и востоке Баренцева моря (БМ) наблюдается статистически значимый отрицательный линейный тренд суммарного теплового баланса поверхности моря за зимний период тренд порядка -1000 (МДж/м²×сут)/40 лет [3]. То есть, в этих районах в последние годы поверхность моря теряет гораздо больше тепла за зиму, чем в более ранние годы. Отдается ли с поверхности моря в зимний период тепла больше за счет поступления тепла летом от атмосферы. В данной работе рассмотрим изменчивость суммарного теплообмена в летний период и его связь с теплообменом в последующий зимний период. Цель данной работы — изучение особенностей теплообмена в зимний период на поверхности Баренцева моря.

Использованы данные коротковолновой и длинноволновой радиации, потоков явного и скрытого тепла атмосферного по результатам реанализа ERA5 (Европейский анализ, версия 5). Этот реанализ выполняется с использованием термодинамической модели атмосферы Европейского центра среднесрочного прогнозирования погоды. Составляющие теплового баланса рассчитываются по аэродинамическим балк-формулам (упрощенные объемные формулы) [4]. Продукт имеет горизонтальное разрешение $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ по широте и долготе и шаг по времени 1 час. Использованы данные с 1979 по 2019 гг. ТБ поверхности моря рассчитан, как сумма потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, явного и скрытого тепла. Данные осреднили посуточно. Тепловой баланс сгладили 30-дневным скользящим средним. Определили даты перехода ТБ через ноль для каждого сезона следующим образом: выбирали те даты, после которых продолжительность периода с тепловым балансом выше и ниже 0 была наибольшей. Рассчитали сумму теплового баланса за зимний и летний периоды (ТБ_{ЗИ}, ТБ_{ЛП}) ограниченные таким образом датами начала и окончания сезонного охлаждения.

В весенне-летний период по всей акватории положительные значения ТБ_{ЛП}, которые говорят о поступающем тепле из атмосферы в океан. Среднее ТБ_{ЛП} с 1979 по 2018 гг. не показывает четко выраженное зональное распределение значений. Среднее максимальное поступление тепла на поверхность моря в летний период за исследуемый период отмечается вдоль побережья, в районе Мурманского мелководья и Северо-Канинской банки $1200 - 1500$ МДж/м²×сут. Также, высокие значения среднего ТБ_{ЛП} наблюдаются в районе Шпицбергенской банки и острова Медвежий $1200 - 1400$ МДж/м²×сут. Вдоль Центрального желоба среднее ТБ_{ЛП} составляет $1000 - 1100$ МДж/м²×сут. По всей остальной акватории среднее ТБ_{ЛП} составляет $700 - 950$ МДж/м²×сут. Коэффициент линейного тренда ТБ_{ЛП} на севере, северо-востоке моря положительный. Максимальный коэффициент линейного тренда в проливе между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля 329 МДж/м²×сут за 40 лет, в районе желоба Персея составляет 160 МДж/м²×сут за 40 лет, в районе Шпицбергенской банки 80 МДж/м²×сут за 40 лет. Коэффициент линейного

тренда в районе Западного желоба (рядом со Шпицбергенской банкой) составляет -400 МДж/м^2 за 40 лет, на Центральной возвышенности близится к 0, в Центрального желоба составляет $-200 \text{ МДж/м}^2 \times \text{сут}$ за 40 лет.

Рассчитана разность между суммарным тепловым балансом на поверхности моря в летний и зимний периоды, значения в зимний период были взяты по модулю с положительным знаком. Это позволит оценить вклад теплообмена летом в теплообмен в зимний период. По всей акватории наблюдаются отрицательные значения разности, что значит, с поверхности моря в зимний период отдается больше тепла в атмосферу, чем поступает из атмосферы летом. Максимальное среднее значение разницы теплового баланса между летним и зимним периодами отмечается в юго-западной части моря и составляет $-3000 \text{ МДж/м}^2 \times \text{сут}$, а минимальное – в северной, северо-восточной части моря $-500 \text{ МДж/м}^2 \times \text{сут}$. В прибрежной части, в районе острова Колгуев разница составляет от -500 до $-1000 \text{ МДж/м}^2 \times \text{сут}$. На всей остальной акватории разница между $\text{ТБ}_{\text{ЛП}}$ и $\text{ТБ}_{\text{ЗП}}$ составляет от -1500 до $-2500 \text{ МДж/м}^2 \times \text{сут}$. Коэффициент линейного тренда разности $\text{ТБ}_{\text{ЛП}}$ и $\text{ТБ}_{\text{ЗП}}$ по всей акватории отрицательный или в некоторых районах близится к 0. Значимый отрицательный тренд разности $\text{ТБ}_{\text{ЛП}}$ и $\text{ТБ}_{\text{ЗП}}$ в северной и северо-восточной части составляет $-1500 \text{ МДж/м}^2 \times \text{сут}$ за 40 лет, в районе возвышенности Персея $-800 \text{ МДж/м}^2 \times \text{сут}$ за 40 лет.

С поверхности Баренцева моря в зимний период отдается тепла в среднем 1,5-2 раза больше, чем поступает летом. В таком случае на увеличение теплоотдачи в зимний период поверхности моря влияет усиление «атлантификации», заключающейся в продвижении зоны влияния атлантических вод на гидрологический и ледовый режим [1,2].

Проект РНФ: 19-17-00110 «Тепломассопереносы в Атлантическом и Северном Ледовитом океанах как факторы, определяющие изменения гидрологического и ледового режимов" 2022-2023.

Список литературы

- 1) Иванов В. В. и др. Изменение гидрологических условий в Баренцевом море как индикатор климатических трендов в евразийской Арктике в XXI веке // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2022. – №. 1. – С. 13-25
- 2) Сумкина А. А. и др. Сезонное очищение ото льда Баренцева моря и его зависимость от адвекции тепла Атлантическими водами // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2022. – Т. 15. – №. 1. – С. 82-97
- 3) Сумкина А. А. и др. Анализ изменений параметров зимнего теплового баланса Баренцева моря // Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса : материалы X международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов, Москва, 10–11 ноября 2022 года / Федеральное агентство по рыболовству, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии». – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, 2022. – С. 397-399
- 4) Hersbach H., Dee D. ERA5 reanalysis is in production. ECMWF Newsl, 147. – 2016
- 5) Smedsrud L. H. et al. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system // Reviews of Geophysics. – 2013. – Т. 51. – №. 3. – С. 415-449

АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ ПО ДАНЫМ РЕ-АНАЛИЗА ORA-S3 ЗА 1980–2011 ГГ.

Сухонос П.А.

Институт природно-технических систем, г. Севастополь

Ключевые слова: верхний перемешанный слой, Северная Атлантика.

Межгодовые аномалии температуры и толщины верхнего перемешанного слоя (ВПС), суммарного потока тепла на поверхности океана и модуля касательного напряжения трения ветра в ряде регионов Северной Атлантики обладают негауссовой изменчивостью [1]. В восточной части Северной Атлантики распределение аномалий указанных характеристик имеет значимую положительную асимметрию. В данной работе проанализированы линейные зависимости между аномалиями этих параметров в области к югу от Азорских островов.

Используются среднемесячные данные океанического ре-анализа ORA-S3 [2] за период 1980–2011 гг. Температура ВПС определяется как средняя температура в слое от поверхности океана до нижней границы ВПС, положение которой переменна по пространству и времени. В области к югу от Азорских островов была выбрана трапеция $2^\circ \times 2^\circ$ с центром в 30° с. ш. 30° з. д. Из временных рядов за указанный период удалён линейный тренд для каждого календарного месяца. Коэффициенты тренда рассчитывались по методу наименьших квадратов. Далее выполнено нормирование значений за каждый месяц на среднее квадратическое отклонение межгодовых изменений за указанный период для этого месяца. Поскольку рассматриваемые характеристики не являются нормально распределёнными, то для выявления тесноты связей между ними используется ранговая корреляция Спирмена.

Аномалии температуры и толщины ВПС имеют синхронную отрицательную связь с коэффициентом корреляции равным $-0,38$. Заглубление ВПС сопровождается вовлечением холодной воды в ВПС и, как следствие, охлаждением ВПС и наоборот. Аномалии суммарного потока тепла на поверхности океана и температуры ВПС значимую синхронную связь не имеют. При лидировании суммарного потока тепла на 1 месяц между этими параметрами возникает отрицательная связь с коэффициентом корреляции равным $-0,33$. Отток тепла с поверхности океана сопровождается охлаждением ВПС на следующий месяц и наоборот. Аномалии суммарного потока тепла на поверхности океана и модуля касательного напряжения трения ветра имеют синхронную положительную связь с коэффициентом корреляции равным $0,40$. Аномалии модуля касательного напряжения трения ветра и температуры ВПС имеют синхронную отрицательную связь с коэффициентом корреляции равным $-0,33$. При лидировании ветрового воздействия на 1 месяц между этими параметрами возникает более сильная отрицательная связь с коэффициентом корреляции равным $-0,38$. Интенсификация ветрового воздействия способствует оттоку тепла с поверхности океана и заглублению и охлаждению ВПС, более сильно выраженному на следующий месяц. Такой сдвиг обусловлен термической инерцией ВПС.

Таким образом, в области к югу от Азорских островов аномалии суммарного потока тепла и модуля касательного напряжения трения ветра, обладающие значимой положительной асимметрией, имеют тесную положительную связь между собой. Аномалии указанных параметров при лидировании на 1 месяц сопровождаются формированием аномалий температуры ВПС противоположного знака.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИПТС № госрегистрации 121122300074-7.

Список литературы

- 1) Сухонос П.А. Анализ асимметрии характеристик верхнего слоя Северной Атлантики по данным ре-анализа ORA-S3 // Системы контроля окружающей среды. 2022. № 4 (50). С. 15–24. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2022-4-15-24>
- 2) Balmaseda M.A., Vidard A., Anderson D.L.T. The ECMWF ocean analysis system: ORA-S3 // Monthly Weather Review. 2008. V. 136. № 8. P. 3018–3034. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2433.1>

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА БЕРИНГОВА МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Титовской А.В., Фролова Н.С., Заболотских Е.В.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Берингово море, ледяной покров, спутниковые данные, площадь льда, ледовый режим, дрейф льда, кромка льда.

Динамика морского льда как важной составляющей климатической системы приводит к изменению свойств морской поверхности, что оказывает влияние на характер взаимодействия океана и атмосферы. Образующиеся при этом участки открытой воды приводят к существенной потере тепла океаном, в результате чего изменяются атмосферная циркуляция и температура воды на различных временных масштабах в деятельном слое океана [1, 2, 3].

В этой связи важными информационными характеристиками ледовых условий являются сплоченность морского льда и положение его кромки, их сезонная и межгодовая изменчивость. Кроме того, оценка и анализ изменчивости ледовых условий в Беринговом море, без сомнения, представляет интерес для исследования проблемы изменения климата. Недавние работы указали на основные различия в поведении ледяного покрова Берингова моря и Северного Ледовитого океана, а именно то, что до сих пор Берингово море активно сопротивлялось сильным изменениям климата, происходящих в настоящее время в Арктике [4].

Цель работы заключается в анализе пространственно-временной изменчивости ледяного покрова Берингова моря по данным дистанционного зондирования земли.

Данные площади ледяного покрова Берингова моря за период 1979-2020 гг. взяты с сервиса NOAA со свободным доступом [5]. Данные получены с помощью микроволновых радиометров.

Для анализа пространственно-временной изменчивости ледяного покрова Берингова моря использовались среднесуточные карты сплоченности льда, построенные в Matlab по данным сканирующих микроволновых радиометров AMSR-E и AMSR-2 за период с 01.06.2002 по 01.03.2022.

Оценка ледовых условий, таких как дрейф льда, сплоченность, начало ледообразования, очищение моря от льда, проводилась визуально.

Для исследования динамики кромки морского льда был составлен ряд среднемесячных значений широты ее расположения для каждого градуса долготы от 165° в. д. до 160° з. д. По этим данным получены осредненные за период 2002-2022 гг. скорости смещения кромки по широте. Подобная методика исследования была использована в работе [6].

При анализе площади ледяного покрова установлено, что средняя площадь Берингова моря, покрытая льдом, составляет 0.228 млн км^2 , причем, начиная с 2014 года, значения площади были ниже среднего, а в 2018 году и вовсе минимальной за 42 года (0.073 млн км^2). Годом максимальной площади ледяного покрова Берингова моря стал 2012 (0.357 млн км^2).

Наиболее активная фаза ледообразования отмечается в декабре, затем, в марте, наступает пик ледовитости (27.43%), и уже в апреле наблюдается наиболее стремительное таяние льда.

Анализ продолжительности ледового периода Берингова моря за последние 20 лет показывает, что даты начала ледообразования варьируются от 14 октября (2013 год) до 9 ноября (2003 год), даты полного очищения от льда – от 12 июня (2006 год) до 14 июля (2003 год). Средняя продолжительность ледового периода составила 280 суток, как, например, в 2009-2010 годах. Дольше всего море было покрыто льдом в 2013-2014 годах (302 суток), противоположная ситуация отмечается в 2017-2018 годах (255 суток).

Проанализированы карты с максимальными, минимальными и средними ледовыми условиями. Заметны существенные различия в распространении ледяного покрова, особенно в меридиональном направлении, однако сплоченность, по большей части, остается неизменной ($80-100\%$).

На дрейф льда сильное влияние оказывают течения и ветер. Под действием силы Кориолиса при ветре северных румбов лед дрейфует в южных и западных направлениях, при южных ветрах – на север и восток. Влияние течений отчетливо видно в прибрежных районах (в Анадырском заливе, Беринговом проливе, у п-ова Камчатка).

При общем анализе скоростей смещения кромки морского льда следует отметить несколько особенностей. Максимальные значения скоростей смещения кромки на юг наблюдаются в декабре, на север – в мае. Вторая особенность состоит в том, что наибольшие значения скоростей смещения кромки как на юг, так и на север наблюдаются вдоль 171-166° з.д. Это объясняется тем, что почти вся область между этими меридианами пролегает в мелководной части Берингова моря, где водные массы аккумулируют в себе значительно меньше тепла, также в этом районе на пути у льда не встречаются крупные участки суши, способные ограничить продвижение его кромки. Третья особенность заключается в относительно низких скоростях смещения кромки от 165° в.д. до 179° в.д. Это район российского побережья, которое расположено на относительно низких широтах, а западный шельф, в свою очередь, уже через несколько километров переходит в материковый склон, и далее – в глубоководную часть моря. Все это препятствует активному ледообразованию в этом районе.

Список литературы

- 1) Доронин Ю.П. Влияние ледового покрова на теплообмен атмосферы с океаном // Проблемы Арктики и Антарктики, 1974, вып. 43–44, с. 52–60.
- 2) Смирнов А.В., Короблев А.А. Взаимосвязь между характеристиками перемешанного слоя и потоками тепла на границе раздела океан–атмосфера в Северо-Европейском бассейне // Пробл. Арктики и Антарктики, 2010, № 3 (86), с. 79–88.
- 3) Еремеев В.Н., Букатов А.Е., Букатов А.А., Бабий М.В. Межгодовая изменчивость теплообмена океана и атмосферы в Антарктике // Докл. Нац. академии наук Украины, 2013, № 1, с. 96–104.
- 4) Brown, Z. W. and Arrigo, K. R.: Contrasting trends in sea ice and primary production in the Bering Sea and Arctic Ocean, ICES J. Mar. Sci., 69, 1180–1193, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss113>, 2012.
- 5) National Centers for Environmental Information (NCEI) [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/regional-sea-ice/extent/Bering/0>
- 6) Букатов А. Е., Букатов А. А., Бабий М. В. Пространственно-временная изменчивость распределения морского льда в Арктике // Криосфера Земли. – 2017. – Т. 21. – №. 1. – С. 85–92.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЭНЕРГЕТИКИ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ ЛОФОТЕНСКОЙ КОТЛОВИНЫ

Травкин В.С.^{1,2}, Жмур В.В.³, Белоненко Т.В.¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

²СПО ФГБУ ГОИН, г. Санкт-Петербург

³Московский физико-технический институт, г. Москва

Ключевые слова: физика океана, мезомасштабные вихри, Норвежское море, кинетическая энергия, потенциальная энергия.

Лофотенская котловина (ЛК), расположенная в северо-восточной части Норвежского моря, является одной из наиболее энергоактивных зон Мирового океана. С запада она ограничена хребтами Мона и Ян-Майен, с юга – плато Воринг, а с востока – континентальным склоном Норвегии. Мезомасштабные вихри отрываются от ветвей Норвежского течения и перераспределяют теплые и соленые воды по всей акватории котловины.

В центральной части ЛК располагается квазипостоянный антициклонический Лофотенский вихрь (ЛВ), являющийся внутрипикноклинной линзой теплых и соленых вод. Он характеризуется высокими значениями относительной завихренности, радиусом порядка 32-39 км и орбитальными скоростями около 0,7-0,8 м/с [1]. Как и в районе Норвежского течения, в районе месторасположения ЛВ зафиксировано повышение кинетической и потенциальной энергии. Такая тенденция свидетельствует о значительной роли мезомасштабных вихрей в энергетике Лофотенской котловины.

Целью данной работы является сравнительная оценка вклада мезомасштабных циклонов, антициклонов и других динамических структур в общую энергетiku Лофотенской котловины. Для получения данной оценки за период 1993-2019 гг. в работе используется один из методов автоматической идентификации мезомасштабных вихрей, подробно описанный в работе [2].

В работе используются данные глобального океанического реанализа GLORYS12V1, предоставленного СМЕМС (Copernicus Marine Service – СМЕМС). Данные имеют пространственное разрешение порядка $1/12^\circ$ по широте и долготе и 50 уровней по вертикали. Временное разрешение данных составляет 1 сутки.

Алгоритм автоматической идентификации мезомасштабных вихрей определяет вихри как замкнутые структуры с положительными аномалиями уровня моря у антициклонов и отрицательных у циклонов. Метод имеет ряд недостатков, однако, несмотря на них, он демонстрирует хорошую точность, позволяя верно определить порядка 96,4% мезомасштабных вихрей.

В нашей работе мы анализируем межгодовую и сезонную изменчивость суммарной вихревой кинетической и потенциальной энергии циклонов и антициклонов. Также даются оценки общей кинетической и потенциальной энергии ЛК, энергии мезомасштабных вихрей, а также филаментов и фоновых течений. Кроме того, описывается пространственная изменчивость общей средней кинетической и потенциальной энергии, осредненная за 1993-2019 гг.

Полученные результаты свидетельствуют о доминировании потенциальной энергии над кинетической в Лофотенской котловине. Районами, с наибольшими значениями потенциальной энергии является центральная часть ЛК, тогда как максимум кинетической энергии обнаружен в центре ЛК и на ее периферии. В зимне-весенний период наблюдается увеличение кинетической и потенциальной энергии Лофотенской котловины. В среднем, доля кинетической и потенциальной энергии вихрей составляет 7 и 8%, соответственно. Такие значения свидетельствуют, что на общую

энергетику Лофотенской котловины оказывают существенное влияние не только мезомасштабные вихри, но и филаменты и фоновые течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 22-27-00004. В. В. Жмур поддержан средствами государственного бюджета по государственному заданию № 0128-2021-0002.

Список литературы

- 1) Травкин В.С., Белоненко Т.В. Исследование вихревой изменчивости в Лофотенской котловине на основе анализа доступной потенциальной и кинетической энергии // Морской гидрофизический журнал Т. 37, № 3. 2021. С. 318–332. — DOI: 10.22449/0233-7584-2021-3-318-332
- 2) Faghmous J.H., Frenger I., Yao Y., Warmka R., Lindell A., Kumar V. A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry // Scientific Data Vol. 2. 2015. P. 150028. DOI: 10.1038/sdata.2015.28

ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО ЖЕЛОБА

Травкин В.С.^{1,2}, Белоненко Т.В.¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² СПО ФГБУ ГОИН, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: физика океана, мезомасштабные вихри, топографические волны, Курило-Камчатский желоб.

Топографические волны Россби образуются в районах Мирового океана, где значительны крупномасштабные топографические изменения морского дна. Они могут проявляться в виде перемещающихся мезомасштабных вихрей, пространственный размер которых лежит в диапазоне от нескольких десятков до первых сотен км, а период волн – от нескольких суток до нескольких лет. Топографические волны принадлежат к типу захваченных волн, поскольку энергия этих волн захватывается в областях с крупномасштабными изменениями донной топографии, а вне их затухает. Они оказывают существенное воздействие на энерго- и массообмен Мирового океана, короткопериодные колебания климата, а также на апвеллинг и биопродуктивность прибрежных акваторий [1,2].

Предметом нашего исследования являются низкочастотные волны в районе Курильского шельфа и Курильского желоба. Данный район характеризуется повышенной синоптической активностью вихрей, чему способствуют динамические условия. В данной области происходит сложное динамическое взаимодействие двух крупномасштабных течений: холодного Ойясио с теплыми рингами Куроисио, а изменчивость океанологических параметров наблюдается в широком диапазоне пространственно-временных масштабов.

В последние годы появилось множество новых цифровых продуктов, которые позволяют изучать волновые процессы в океане на основе эмпирического материала. Одним из таких продуктов является новый спутниковый продукт «МЕТА3.2 DT», который используется для анализа траекторий мезомасштабных вихрей Курильского района, являющихся проявлением топографических волн в исследуемом регионе. Таким образом, целью работы является изучение топографических волн в Курильском районе с привлечением спутниковых и модельных данных.

В работе используются данные «Атласа траекторий мезомасштабных вихрей», доступные на портале AVISO+ (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/value-added-products/global-meso-scale-eddy-trajectory-product/meta3-2-dt.html>). Атлас основан на использовании альтиметрической информации (высоты поверхности моря) для идентификации и определения траекторий циклонов и антициклонов Мирового океана. Алгоритм выделяет изолированные вихревые структуры в поле уровня и в дальнейшем следит за ними, фиксируя их эволюцию во времени. Массив содержит информацию о типе вихрей, их радиусе и амплитуде, скорости вращения, продолжительности жизни. Каждому вихрю присваивается свой идентификационный номер и координаты его траектории. Алгоритм идентифицирует вихри, как скопления ячеек, удовлетворяющие определенному набору критериев, таких как: компактность, наличие экстремума аномалий уровня океана внутри вихревой структуры и т.д. В работе рассматривались данные за 01.01.93 по 02.08.21.

Также в работе использовался реанализ GLORYS12V1, доступный на портале Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). Пространственное разрешение данных составляет $1/12^\circ$ по широте и долготе. Рассматривались данные за 1993–2021 гг.

Установлено, что в Курильском районе прослеживается несколько систем топографических волн, перемещающихся вдоль изобат на крупномасштабных топографических склонах. Эти волны

проявляются в виде цепочек мезомасштабных вихрей. Анализируя данные Атласа мезомасштабных вихрей – продукт МЕТАЗ.2 ДТ, мы установили четыре системы вихрей, каждая из которых распространяется по своему склону.

Мы показали, что антициклоны распространяются по шельфу в виде шельфовых волн на юго-запад, а вдоль мористой стороны Курильского желоба на северо-восток, в то время как циклоны – вдоль внутренней стороны желоба и вдоль топографического поднятия на юго-запад. Во всех случаях, вихри распространяются так, что более мелкая вода остается справа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 22-27-00004.

Список литературы

- 1) Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане, в 2-х томах // М., Мир. 1981. 846 с.
- 2) Ефимов В.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В. Волны в пограничных областях океана // Л.: Гидрометеиздат. 1985. 250 с.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ КОНЕЧНЫХ АНСАМБЛЕЙ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ВОЛН

Трегубов А.С.^{1,2}, Диденкулова Е.Г.^{1,2}, Кокорина А.В.², Диденкулов О.И.²

¹Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Нижний Новгород

²Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Ключевые слова: ветровые волны, волны-убийцы, статистика волновых записей, Охотское море, натурные измерения.

Волны-убийцы - принятое в русскоязычной литературе название неожиданных аномально высоких волн в море. В англоязычной литературе за ними закрепились термины «freak waves» или «rogue waves» [1-2]. Такие волны, как правило, возникают внезапно без видимых причин, и имеют небольшое время жизни от нескольких минут до десятков секунд. В океанографии волны-убийцы более точно определяются как волны, высота которых более чем в два раза превышает значительную высоту волны, которая в свою очередь определяется как среднее значение трети наибольших волн в волновой записи. Следовательно, волны-убийцы не обязательно являются самыми большими волнами на воде; это, скорее, необычно большие волны для данного состояния моря. Такие волны несут в себе серьезную опасность для судов, нефтегазовых платформ, прибрежной инфраструктуры и людей, отдыхающих на берегу, поэтому в настоящее время являются объектом для изучения.

В результате обширных наблюдений постепенно накапливается статистика волн-убийц, которая позволяет исследовать механизмы их образования, характерную форму, время жизни и вероятность их появления в разных условиях. Многочисленные натурные данные измерения поверхностных волн в различных акваториях демонстрируют большую распространенность волн-убийц в Мировом океане [3-4]. Данная работа посвящена анализу долговременных записей поверхностных волн вблизи острова Сахалин. Начиная с 2009 года Специальным конструкторским бюро средств автоматизации морских явлений ДВО РАН проводятся непрерывные измерения колебаний уровня моря у южных берегов острова. В настоящей работе для обработки используются данные, полученные с сентября 2012 г. по май 2015 г. автономными донными регистраторами гидростатического давления [5-6]. Приборы измеряют пульсации придонного давления, индуцированного поверхностными волнами. Для пересчета смещения поверхности используется гидростатическое приближение: $p = p_{atm} + \rho g(h + \eta)$.

Полученные записи поверхностных волн включает в себя периоды штормов, плавучих льдов и умеренного ветра, вследствие чего имеет место значительная неоднородность. Для получения представительной статистики волн и волн-убийц в частности, исходная длинная запись разбивается на отрезки по 20 минут (предполагается, что колебания уровня воды в рамках 20-минутного интервала является квазистационарным случайным процессом), по значительной высоте и периоду волн устанавливаются режимы волнения, затем для каждого режима по математическому критерию (превышение в два или более раза высоты индивидуальной волны значительной высоты) выполняется поиск аномально больших волн.

Таким образом, в работе представлена методика анализа данных непрерывных долговременных измерений волн, произведено разбиение данных на статистически однородные фрагменты, в них выделено 350 волн-убийц (из ~2.5 миллионов индивидуальных волн), получен характерный для данных географических и метеорологических условий волновой спектр. Также в работе описана методика восстановления смещения водной поверхности по данным датчика придонного давления. Выявлено, что функция распределения высот волн хорошо согласуется с распределением Глуховского, однако присутствуют фрагменты данных, содержащие в себе выделяющиеся из общей статистики волны.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 22-17-00153).

Список литературы

- 1) Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Волны-убийцы: факты, теория и моделирование: монография изд. 2-е. – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2015. 178 с.
- 2) Kharif Ch., Pelinovsky E. and Slunyaev A., Rogue Waves in the Ocean. Springer, 2009. 216 p.
- 3) Christou M., Ewans, K. Field Measurements of Rogue Water Waves // Journal of Physical Oceanography 2014. V. 44. P. 2317–2335
- 4) Didenkulova I., Anderson C. Freak waves of different types in the coastal zone of the Baltic Sea // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2010. V. 10. P. 2021-2029
- 5) Зайцев А.И., Малащенко А.Е., Пелиновский Е.Н. Аномально большие волны вблизи южного побережья о.Сахалин // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2011, том 4, № 4, С.35-43
- 6) Кузнецов К.И., Зайцев А.И., Костенко И.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Наблюдения волн-убийц в прибрежной зоне о. Сахалин // Экологические системы и приборы, 2014, №2, С.33-40

МЕЗОМАСШТАБНЫЕ КУРИЛЬСКИЕ ВИХРИ В ЭПОХУ АЛЬТИМЕТРИИ: ПЕРЕПИСЬ И СВОЙСТВА

Удалов А.А., Будянский М.В., Пранц С.В.

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН, г.
Владивосток*

Ключевые слова: Курильские вихри, автоматическое детектирование, кинематические свойства, состав воды, лагранжеев анализ.

Район Курило-Камчатского жёлоба вдоль Курильских островов с высокой биопродуктивностью и важным местом рыбного промысла в РФ является зоной конвергенции субарктических и трансформированных субтропических вод со значительным влиянием на погоду и климат. Несмотря на большую роль Курильских вихрей (КВ) в переносе тепла, солей, питательных веществ и в рыбном промысле [1], в наших знаниях о свойствах и динамике этих энергичных крупномасштабных образований в северо-западной части Тихого океана все еще существуют большие пробелы. Используя данные альтиметрии с 1993 по 2021 гг., мы провели первую систематическую перепись всех мезомасштабных КВ с помощью алгоритма автоматического отслеживания вихрей AMEDA. Используя новые лагранжеевы методы [2], данные альтиметрии и измерения температуры и солёности профилирующими буями Арго, проведено подробное исследование кинематических и других свойств этих вихрей.

По месту формирования все КВ были разделены на почти равные по площади области, расположенными относительно почти меридиональной оси Курило-Камчатского жёлоба и почти зональной оси, пересекающей пр. Буссоль: 1я область – к северо-западу относительно этих осей, 2я – к северо-востоку, 3я – к юго-западу и 4я – к юго-востоку. Во 2й и 4й областях к востоку от желоба обнаружено почти в два раза больше вихрей, чем в 1й и 3й областях между островами и желобом. Это отражает разницу в частоте формирования КВ, обусловленную наличием субарктического фронта, проходящего через 4ю область и частично через 2ю область. Обнаружено неоднородное пространственно-временное распределение КВ. Антициклоны сосредоточены в основном вдоль жёлоба, тогда как циклоны – по обе стороны жёлоба, что вызвано различными физическими механизмами взаимодействия вихрей разной полярности с топографией дна. Показано, что жёлоб играет роль «вихревода» для долгоживущих антициклонов, при этом сравнительно небольшое число КВ может пересечь жёлоб.

Найдены области максимальной концентрации и стагнирования антициклонов в районе пр. Буссоль и мыса Носашпу у о-ва Хоккайдо и циклонов вдоль субарктического фронта. Среди наблюдаемых долгоживущих КВ более 90% имели параметр нелинейности больше 1. Это означает, что большинство КВ представляют собой когерентные вихри, переносящие воду вместе с ее свойствами. Концентрация различных типов воды внутри ядер КВ каждой группы вычислялась с использованием новой лагранжеевой методики для оценки процентного содержания пяти водных масс: субтропической воды Куроисио, субарктических вод Ойяисио и Аляскинского струйного течения, охотоморской воды и трансформированной субтропической воды из Японского моря. Это позволило обнаружить перенос субтропических вод в ядрах КВ на север и субарктических вод на юг на расстояние порядка 1000 км и более.

Осредненные профили потенциальной температуры и солёности буев Арго и соответствующие T-S диаграммы похожи в ядрах КВ в 1й, 2й и 3й областях. Они демонстрируют типичную субарктическую структуру вод с теплым мезотермальным слоем в диапазоне 200 – 800 м, находящемся под холодным дихотермальным слоем. Профили в ядрах КВ в 4й области отличаются, представляя смесь теплой и соленой субтропической воды Сангарского течения и Куроисио и субаркти-

ческой воды Ойясио. Потенциальная температура постепенно снижается с глубиной, а соленость увеличивается.

Тема Госзадания ТОИ ДВО РАН "Моделирование разномасштабных динамических процессов в океане" (№ 121021700341-2).

Список литературы

- 1) S.V. Prants, M.V., Budyansky, M.Yu. Uleysky, Kulik V.V. Lagrangian fronts and saury catch locations in the Northwestern Pacific in 2004-2019. *J. Marine Systems*. 2021. V. 222. Art. No. 103605.
- 2) S.V. Prants, M.Yu. Uleysky, M.V. Budyansky. *Lagrangian oceanography: large-scale transport and mixing in the ocean*. Berlin, New York. Springer Verlag. 2017. 271 p.

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ АЙСБЕРГОВ НА ОСНОВЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ АЙСБЕРГОВОЙ УГРОЗЫ

Устинова Т.С., Волков А.С., Волков В.А.

*Научный фонд Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена
(Фонд "Нансен центр"), г. Санкт-Петербург*

Ключевые слова: айсберги, SAR, Северный морской путь, опасные ледяные образования.

Радары с синтезированной апертурой (SAR) являются одними из основных инструментов исследования ледяного покрова в Арктике: как активные системы, они не зависят от дневного света, а как микроволновые, они в значительной степени независимы от погоды. Национальные ледовые службы активно используют радиолокационные изображения в качестве основного источника данных для мониторинга морского льда и опасных ледяных образований [1,2]. Район мыса Желания – оживленный участок Северного Морского Пути, по которому проходит одна из оптимальных трасс плавания. Идентификация опасных ледяных образований играет важное значение в обеспечении безопасности судоходства и других морских операций на акватории.

Цель данной работы – исследовать возможность автоматического обнаружения айсбергов в условиях открытой воды, припая и дрейфующего льда на SAR-изображениях. В основе работы взяты радиолокационные данные миссии Sentinel-1 Extra-Wide Swath (EWS). В качестве тестового региона выбран район к северу от Новой Земли, где размер айсбергов близок к порядку пространственного разрешения EWS режима.

Автоматизированный алгоритм включает в себя три этапа: предварительная сегментация изображений для обнаружения областей ярких точек – зон, содержащих признаки айсбергов или кораблей; обучение свёрточной нейронной сети на основе данных наблюдений «Statoil» [3]; разделение обнаруженных объектов на классы «айсберг» и «судно». Наличие дрейфующего льда и малые размеры айсбергов стали лимитирующими факторами при разработке достоверных критериев айсберговой опасности для зимних месяцев (декабрь – июнь).

Численный эксперимент показал, что ледовый покров любого характера может стать препятствием для нахождения опасных ледяных образований, особенно маленьких в масштабах пространственного разрешения радиолокатора. В случае обнаружения объекта во льдах, без учёта косвенных признаков часто айсберги невозможно отличить от торосистых образований. Алгоритм показывает обнадеживающие результаты при условии нахождения объекта на открытой воде. Сформулированы «благоприятные» и «неблагоприятные» условия нахождения айсбергов. Распределение объектов, классифицированных как айсберги, по времени и пространству неравномерно: высокая концентрация наблюдается вблизи очагов образования, особенно в районе Земли Франца-Иосифа.

Список литературы

- 1) Dierking W. Sea ice monitoring by synthetic aperture radar //Oceanography. – 2013. – V. 26. – №. 2. – P. 100-111
- 2) Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Ред. В.Г. Смирнов. СПб.: АНИИ, 2011. – 239 с.
- 3) Yang X., Ding J. A computational framework for iceberg and ship discrimination: Case study on Kaggle competition //IEEE Access. – 2020. – V. 8. – P. 82320-82327

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ БАРЕНЦЕВА МОРЯ ПО ДАННЫМ МИКРОВОЛНОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Устинова Т.С.^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь

² Научный фонд Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена (Фонд "Нансен-центр"), г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: морской лёд, пассивное микроволновое зондирование, Арктика, климатические изменения.

Являясь продуктом взаимодействия океана и атмосферы, ледяной покров служит естественным индикатором интенсивности этого взаимодействия. Стремительные темпы климатических изменений отражаются на процессах ледообразования: меняется длительность периодов таяния, нарастания льда, а также продолжительность безледного периода [1].

Для оценки пространственно-временной изменчивости ледовых условий в данной работе используются данные пассивного микроволнового зондирования. К их главным преимуществам можно отнести: большой пространственный охват; независимость от метеоусловий, времени года; длительная и последовательная запись наблюдений; прямая связь со свойствами морского льда или снежного покрова. Основа работы – набор климатических данных (climate data record – CDR) о сплоченности морского льда Национального центра данных по снегу и льду (NOAA/NSIDC, National Snow and Ice Data Center) [2].

В работе представлена методика расчёта дат ключевых ледовых фаз: начало таяния, начало устойчивого таяния, вскрытия акватории ото льда, начало ледообразования и устойчивого ледообразования, полного закрытия акватории льдом. Результаты отчётливо отражают многолетнюю тенденцию к уменьшению площади ледяного покрова. Максимальное развитие достигается с января по апрель, минимальное – в сентябре. Таким образом, абсолютный максимум наблюдался в апреле 1979 года, минимум – в сентябре 2013 года. Общий тренд в уменьшении площади морского льда в Баренцевом море за 43 года составил приблизительно 930 км² в год. Максимальная продолжительность безледного периода соответствует году с минимальной площади льда и составляет 181 день. Средняя продолжительность безледного периода для всей акватории с 1979-2000 гг. составляет 109 суток, для 2000-2017 гг. – 150 суток.

Список литературы

- 1) Stroeve J. C. et al. Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss // Geophysical Research Letters. – 2014. – V. 41. – №. 4. – P. 1216-1225.
- 2) Meier W. et al. NOAA/NSIDC climate data record of passive microwave sea ice concentration // Version. – 2013. – V. 2. – №. 10.7265. – P. N55M63M1.

ПРОВЕРКА УСКОРЕННОГО ПОДХОДА К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЛН

Фокина К.В.^{1,2}

¹Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, Санкт-Петербург

²Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: фазо-разрешающее моделирование, волновой спектр, приток энергии, диссипация волн.

За последние десятилетия опубликовано много работ, посвященных трёхмерному моделированию волн [1]. Наиболее полным подходом считается фазо-разрешающее моделирование, которое определяется как математическое моделирование эволюции возвышения поверхности и поля скорости волн. Общий недостаток всех моделей заключается в их низкой производительности, которая возникает из-за необходимости разрешать вертикальную структуру волнового поля на основе трехмерного уравнения для потенциала скорости.

В [2] предложен новый подход к фазо-разрешающему моделированию трехмерных волн, позволяющий в несколько раз ускорить воспроизведение волновых процессов. Основная идея подхода заключается в том, чтобы заменить сложный алгоритм расчета вертикальной скорости простым двумерным уравнением. Таким образом, трехмерная задача сводится к двумерной, что позволяет проводить вычисления значительно быстрее.

Уравнения модели записаны в нестационарной неортогональной системе координат:

$$\xi = x, \quad \vartheta = y, \quad \zeta = z - \eta(\xi, \vartheta, \tau) \quad (8)$$

где $\eta(x, y) = \eta(\xi, \vartheta, \zeta)$ – движущаяся периодическая волновая поверхность.

Условия на поверхности для потенциальных волн в системе координат (1) принимают следующий вид:

$$\eta_\tau = -\eta_\xi \varphi_\xi - \eta_\vartheta \varphi_\vartheta + (\eta_\xi^2 + \eta_\vartheta^2 + 1)\varphi_\zeta \quad (9)$$

$$\varphi_\tau = -\frac{1}{2}(\varphi_\xi^2 + \varphi_\vartheta^2 - (\eta_\xi^2 + \eta_\vartheta^2 + 1)\varphi_\zeta^2) - \eta - p \quad (10)$$

где φ – потенциал скорости, p – давление на поверхности $\zeta = 0$.

Уравнения (2) и (3) записаны в безразмерном виде с использованием масштабов длины L , времени $L^{1/2}g^{-1/2}$, потенциала скорости $L^{3/2}g^{1/2}$ (g – ускорение свободного падения).

В [2] было предложено представить потенциал скорости φ в виде суммы линейной $\bar{\varphi}$ и нелинейной $\tilde{\varphi}$ компонент. Линейная компонента удовлетворяет уравнению Лапласа с известным решением. Для нелинейной компоненты справедливо уравнение:

$$\tilde{w}_\zeta = 2(\eta_\xi w_\xi + 2\eta_\vartheta w_\vartheta) + \Delta \eta w - s w_\zeta \quad (11)$$

здесь $w = \varphi_\zeta$, $w_\zeta = \varphi_{\zeta\zeta}$, $\Delta = (\)_{\xi\xi} + (\)_{\vartheta\vartheta}$, $s = \eta_\xi^2 + \eta_\vartheta^2$.

Принимая $w = \bar{w} + \tilde{w}$ и учитывая, что $w_\xi = 0$ и $w_\vartheta = 0$, получаем:

$$(1 + s)\tilde{w}_\zeta = 2(\eta_\xi \tilde{w}_\xi + \eta_\xi \tilde{w}_\xi) + \Delta \eta \tilde{w} + 2(\eta_\xi \bar{w}_\xi + \eta_\xi \bar{w}_\xi) + \Delta \eta \bar{w} - s \bar{w}_\zeta \quad (12)$$

Нелинейная компонента вертикальной скорости $\tilde{w} = \varphi_\zeta$ и ее вертикальная производная $\tilde{w}_\zeta = \varphi_{\zeta\zeta}$ оказались связаны друг с другом соотношением [2]:

$$A = \sigma F(\sigma\sigma_L) \quad (13)$$

где σ – безразмерная дисперсия возвышения поверхности, σ_L – дисперсия Лапласиана $\Lambda = \Delta\eta$.

Функция F аппроксимирована формулой

$$F = \frac{d_0\sigma\sigma_L + d_1}{\sigma\sigma_L + d_2} \quad (14)$$

где $d_0 = 0.535$, $d_1 = 0.0414$, $d_2 = 0.00321$.

Таким образом, двумерная модель включает в себя уравнения (2)-(3) и уравнение

$$\tilde{w} = \frac{A(2(\eta_\xi w_\xi + \eta_\vartheta w_\vartheta) + \Delta\eta w - (\eta_\xi^2 + \eta_\vartheta^2)\bar{w}_\zeta)}{\eta_\xi^2 + \eta_\vartheta^2 + 1} \quad (15)$$

Введение нового подхода является важным шагом в прямом моделировании волн, поэтому важно провести дополнительную проверку и сравнить результаты расчетов по ускоренной двумерной модели и полной трехмерной модели, разработанной и описанной ранее в [3]. В работе обе модели запускались с идентичными начальными условиями с разрешением 128x64 Фурье мод, в качестве начальных условий задавался спектр JONSWAP [4]. Шаг по времени равен $\Delta\tau = 0.01$, вычисления проводились для 10,000 временных шагов.

Пошаговое сравнение спектральных характеристик волнового поля, полученных по двум версиям модели, демонстрирует, что решения согласуются на тысячах временных шагов. Незначительные расхождения в результатах находятся в пределах дисперсии каждой характеристики, поэтому их нельзя считать существенными. Как было отмечено ранее, расчеты по полной модели требуют большого количества компьютерного времени, что значительно затрудняет работу с моделью. Предложенная схема упрощенной модели позволяет решить эту проблему и ускорить расчеты в несколько раз. Схема также может быть использована для разработки и корректировки схем параметризации, которые в последующем могут быть включены в точную модель.

Работа проводилась при поддержке Российского Научного Фонда (проект №22-21-00139).

Список литературы

- 1) Chalikov D. Different Approaches to Numerical Modeling of Sea Waves // Fundamental and Applied Hydrophysics. № 15(1). 2022. P. 20-33
- 2) Chalikov D. Accelerated reproduction of 2-D periodic waves // Ocean Dynamics. № 71(10). 2021. P. 309-322
- 3) Chalikov D., Babanin A., Sanina E. Numerical modeling of three-dimensional fully nonlinear potential periodic waves // Ocean Dynamics. № 64(10). 2014. P. 1469-1486
- 4) Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint Sea Wave Project (JONSWAP) // Tsch Hydrogh Z Suppl. № A8(12). 1973. P. 1-95

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЙ В ПРОЛИВЕ БРАНСФИЛДА ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Фрей Д.И.^{1,2,3}, Кречик В.А.¹, Гордей А.С.¹

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва*

² *Московский физико-технический институт, Долгопрудный*

³ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь*

Ключевые слова: Пролив Брансфилда, структура течений, водные массы, ADCP-измерения, Антарктический полуостров, глубинная циркуляция.

Пролив Брансфилда является относительно узким и глубоким проходом между Южными Шетландскими островами и Антарктическим полуостровом, соединяющим море Беллинсгаузена на западе, море Уэдделла на востоке и море Скотия на севере. Этот пролив является одной из самых исследованных акваторий Южного океана; океанографические условия в проливе неоднократно исследовались с начала 20-го века [1]. Регион пролива Брансфилда важен благодаря высокой биологической продуктивности, включая антарктический криль (*Euphausia Superba*), который играет ключевую роль в экосистемах Антарктического полуострова. Также для района пролива Брансфилда характерны сильные климатические изменения, которые влияют на океанографические, метеорологические, и биологические условия этого региона.

Пролив разделен на три основных котловины: восточную, центральную и западную, водообмен глубинными водами между которыми затруднен из-за относительно мелководных хребтов, разделяющих отдельные котловины. Верхний слой океана в этом регионе содержит две основные водные массы: переходную зональную воду с влиянием моря Беллинсгаузена (TBW) и переходную зональную воду с влиянием моря Уэдделла (TWW) [2]. В то время как TBW занимает северную часть пролива и распространяется в северо-восточном направлении вдоль Южных Шетландских островов, то TWW наблюдается в южной части пролива и распространяется в юго-западном направлении вдоль Антарктического полуострова [3]. Поток вод из моря Беллинсгаузена формирует течение Брансфилда, которое является основным элементом циркуляции вод в проливе и устойчиво наблюдается круглый год. Течение имеет ширину от 10 до 20 км и максимальную скорость на поверхности около 50 см/с; перенос течения оценивается в 1 Св [4].

Несмотря на многочисленные работы, посвященные изучению циркуляции в проливе Брансфилд, большая часть полученных результатов основана на геострофических расчетах скоростей течений в проливе. Хорошо известно, что этот подход имеет определенные ограничения и может быть неточен, особенно в условиях узкого пролива со сложным рельефом дна; следует также отметить, что в проливе много небольших островов, которые могут влиять на циркуляцию. Сравнение геострофических расчетов и прямых наблюдений скорости в проливе Брансфилда [5] показывает исключительную важность измерений течений, особенно для потока вод из моря Уэдделла. В связи с этим, в ряде экспедиций Института океанологии в район Антарктического полуострова, проведенных с 2015 по 2022 гг., были выполнены измерения течений акустическими профилографами скорости (ADCP), как в попутном (SADCP), так и в погружном (LADCP) режиме.

Прямые измерения скорости проводились с трех научно-исследовательских судов, "Академик Сергей Вавилов", "Академик Иоффе" и "Академик Мстислав Келдыш", оснащенных акустическими профилографами скорости TRDI Ocean Surveyor с частотами 76.8 кГц и 38.4 кГц. Курс судна определялся с помощью двухантенного GPS-приемника Trimble Dual Antenna GA830, который позволяет измерять направление с высокой точностью. За период с 2015 года был накоплен массив данных, включающих более 150 пересечений пролива. Измерения проводились в диапазоне глубин до 1 км, что позволило детально исследовать вертикальную структуру течений; ранее немногочисленные прямые измерения скорости концентрировались в поверхностном слое. Помимо

попутных наблюдений, в экспедициях 2020-2022 гг. был выполнен ряд зондирований погружным LADCP TRDI WorkHorse Monitor 300 кГц для определения структуры скорости во всем слое от поверхности до дна. Зондирования сопровождались STD-измерениями, что позволило определять также термохалинную структуру вод в проливе.

На основе выполненных измерений была подтверждена циклоническая циркуляция вод в проливе и получены основные характеристики течений. При этом было показано, что периодически происходят затоки вод из моря Уэдделла в западную котловину пролива, что ранее не наблюдалось. Было показано, что течение Брансфилда является преимущественно бароклинным, в то время как поток вод из моря Уэдделла в значительной степени баротропен. Объемные переносы вод были установлены для каждого из течений в разных частях пролива. На основе данных STD-измерений было получено распределение водных масс, в то время как сопутствующие LADCP наблюдения позволили установить объемный перенос отдельно каждой из водных масс. В северной части пролива было впервые обнаружено антициклоническое движение трансформированных вод моря Беллинсгаузена вокруг острова Десеппен. Еще одним новым результатом стало обнаружение придонного потока вод между центральной и восточной котловинами пролива Брансфилда. Особенности динамики вод в районе Антарктического полуострова приводят к тому, что более глубокая восточная котловина заполняется менее плотными водами, что формирует горизонтальный градиент плотности, движущий воду в придонном слое из центральной котловины в восточную. Была показана также существенная изменчивость этого потока, вплоть до смены направления течения в отдельные моменты времени.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-77-10004.

Список литературы

- 1) Clowes A.J. Hydrology of the Bransfield Strait // *Discovery Reports* 9. 1934. P. 1-64.
- 2) García M.A., López O., Sospedra J., Espino M., Gràcia V., Morrison G., et al. Mesoscale variability in the Bransfield Strait region (Antarctica) during Austral summer // *Annales Geophysicae* 12(9). 1994. P. 856-867
- 3) Sangrà P., Gordo C., Hernández-Arencibia M., Marrero-Díaz A., Rodríguez-Santana A., Stegner, et al. The Bransfield Current system // *Deep-Sea Research, Part I: Oceanographic Research Papers* 58(4). 2011. P. 390-402
- 4) Frey D.I., Krechik V.A., Morozov E.G., Drozd I.D., Gordey A.S., Latushkin A.A., Mekhova O.S., Mukhametianov R.Z., Murzina S.A., Ostroumova S.A., et al. Water Exchange between Deep Basins of the Bransfield Strait // *Water* 14, 3193. 2022
- 5) Mukhametianov R.Z., Frey D.I., Morozov E.G. Currents in the Bransfield Strait Based on Geostrophic Calculations and Data of Instrumental Measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. Vol. 58, No. 5. 2022. P. 500–506.

ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В РАЙОНЕ АЛЕУТСКОЙ ГРЯДЫ

Худякова С.П., Белоненко Т.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: мезомасштабные вихри, спутниковая альтиметрия, Аляскинское течение.

Аляскинское течение – один из основных вихреактивных регионов в северной части Тихого океана. Оно распространяется на север от Аляскинского залива, поворачивая на юго-запад в его вершине и затем двигаясь вдоль Алеутских островов. Под Алеутскими вихрями поднимают мезомасштабные антициклонические вихри, формирующиеся к югу от Алеутской гряды в районе 180° . Однако к югу от Алеутской гряды, в северо-западной части Тихоокеанской Субарктики, наблюдаются и циклонические вихри, рассмотренные в данной работе.

В работе использованы данные с сайта французского агентства AVISO. Продукт МЕТА3.2 – атлас траекторий мезомасштабных вихрей, включает в себя массивы для антициклонических и циклонических вихрей с периодами жизни менее 10 дней и более 10 дней. Был рассмотрен период с 01.01.1993 по 02.08.2021 для выбранного региона $50^\circ - 53^\circ$ с.ш. $165^\circ - 180^\circ$ в.д. В исследуемом регионе было обнаружено 1360 антициклонических и 1597 циклонических вихрей с периодом жизни более 10 дней, 622 антициклонических и 811 циклонических вихрей с периодом жизни менее 10 дней.

В синоптическом диапазоне частот вихри подчиняются волновой динамике, поэтому волновой подход применим в их исследовании. Для выбранных точек на желобе был рассчитан бета-эффект [1], что позволяет говорить о причинах «отрыва» вихрей от течения и их тенденции двигаться не вдоль жёлоба, а в северо- или юго-западном направлении. Было получено, что циклонические вихри склонны двигаться по жёлобу, а антициклонические продвигаться зонально на запад со смещением на север относительно желоба на участке глубин 1-2 км.

Список литературы

- 1) Гневых В.Г., Фролова А.В., Колдунов А.В., Белоненко Т.В. Топографический эффект для волн Россби на зональном сдвиговом потоке // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021. Т. 14. № 1. С. 4-14. doi: 10.7868/S2073667321010019

МОДЕЛЬ ДРЕЙФА ШХУНЫ "СВЯТАЯ АННА" ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗОВ NOAA-CIRES-DOE 20CR И ERA-20C

Цедрик С.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: «Святая Анна», дрейф льда, моделирование, NOAA-CIRES-DOE 20CR, ERA-20C.

В начале осени 1912 года паровая шхуна «Святая Анна» под командованием лейтенанта флота Георгия Львовича Брусилова вышла из Александровска-на-Мурмане с 24 членами экипажа на борту. 15 сентября «Святая Анна» прошла пролив Югорский Шар, а 17 – вошла в Карское море. В середине октября судно было затерто льдами и прижато к берегу полуострова Ямал на широте $71^{\circ}45'$. Однако 28 октября 1912 г. юго-восточным ветром береговой припай оторвало, и судно вместе со льдом стало дрейфовать на север [1]. Освободить судно не удалось, и экипаж был вынужден провести две зимы во льдах.

Весной 1914 года стало ясно, что и в этом году «Святая Анна» не освободится ото льдов. 23 апреля (10 апреля по с.с.) штурман В.И. Альбанов и 13 членов команды покинули судно с целью отправиться на юг в поисках земли. Лишь двое из них (В.И. Альбанов и матрос А.Э. Конрад) добрались до мыса Флора на Земле Франца-Иосифа, где были подобраны судном «Св. Фока», остальные погибли в пути или вернулись на судно. Альбанов и Конрад доставили в Санкт-Петербург вахтенный журнал и собранные экспедицией данные. На момент ухода группы Альбанова дрейф судна продолжался непрерывно 542 дня со средней скоростью 2,84 мили в сутки, общая протяженность дрейфа составила 1540 миль [1].

На протяжении плавания и дрейфа определялось положение судна, в вахтенный журнал заносились сведения о погодных условиях и состоянии окружающего судно ледового поля, заполнялись таблицы метеорологических параметров – ежедневные троекратные определения атмосферного давления, скорости и направления ветра, фиксирование среднесуточной температуры воздуха и промеров глубин – ежедневное измерение глубины лотом, что позволило собрать значительный массив данных, характеризующих гидрометеорологические условия в Карском море и Северном Ледовитом океане [2].

Дальнейшая судьба шхуны и оставшихся на ней членов экипажа неизвестна, однако собранный массив данных позволил на его основании провести верификацию атмосферных реанализов XX века 20CR и ERA-20C. В работе выполняется верификация с использованием значений среднеквадратического отклонения и линейного коэффициента корреляции для скалярных величин (температура воздуха и атмосферное давление) и индикатора векторной корреляции [3] для векторов ветра. Полученные значения индикаторов векторной корреляции (0,64 и 0,55; 0,38 и 0,32 соответственно для холодных и тёплых месяцев реанализов 20CR и ERA-20C) указывают на возможность использования данных реанализа 20CR для создания модели вынужденного дрейфа затёртого льдами судна после ухода группы Альбанова.

Модель дрейфа шхуны «Святая Анна» основана на формулах ветрового дрейфа льда: скорость дрейфа судна приравнивалась скорости ветра, умноженной на ветровой коэффициент [4], направление дрейфа определялось по направлению ветра с учетом угла отклонения ветрового дрейфа. Траектория дрейфа судна рассчитывалась с использованием Лагранжева описания гидродинамики по явной схеме Эйлера с суточной дискретностью. На каждом шаге информация из атмосферного реанализа 20CR интерполировалась в точку положения судна, по ней рассчитывались скорость и направление дрейфа судна и координаты нового положения судна на следующий вре-

менной шаг. Начальными условиями служили последние известные координаты судна ($82^{\circ}55'30''$ с.ш. $60^{\circ}45'$ в.д., 23.04.1914)

Модель имеет ряд ограничений: в ней не учитывается внутреннее взаимодействие в ледяном покрове, влияние берегов на дрейф льда, наклон уровня моря и подледные течения. Но даже такая грубая модель позволяет получить представление о положении судна после апреля 1914.

Согласно результатам, полученным при реализации модели с использованием реанализа 20CR, в течение года после ухода группы Альбанова «Святая Анна» продолжила движение с преобладанием северо-западного направления по ломаной траектории ($83^{\circ}07'$ с.ш. $60^{\circ}00'$ в.д, когда шхуну развернуло на юг, $82^{\circ}55'$ с.ш. $57^{\circ}10'$ в.д., когда она вернулась к первоначальному направлению) до достижения $83^{\circ}12'$ с.ш. $55^{\circ}39'$ в. д., когда она развернулась на юг и снова приблизилась к Земле Франца-Иосифа, где продрейфовала в течение нескольких месяцев вдоль её северной оконечности примерно на широте 82° .

Полученные при моделировании данные могут не только использоваться для изучения дрейфа льдов Северного Ледовитого океана, но и представлять интерес для исторической науки как материал для реконструкции дальнейшей судьбы экспедиции.

Список литературы

- 1) Саватюгин Л.М., Дорожкина М.В. И с помощью Божией всё будет благополучно // Проблемы Арктики и Антарктики. № 3 (92). 2012. С. 110-118
- 2) Брейтфус Л. Полярная экспедиция лейтенанта Г.Л. Брусилова на шхуне «Св. Анна». 1914. Типография Морского Ведомства.
- 3) Иванов Н.Е. О характеристиках корреляции скоростей ветра, морских течений и дрейфа льда // Метеорология и гидрология. №8. 2004. С. 61-73
- 4) Воробьёв В.Н., Гудкович З.М. О внутригодовой изменчивости в дрейфе льдов и течениях Арктического бассейна // Труды ААНИИ. Т. 303. 1971. С. 76-88

ПРОЯВЛЕНИЕ ВОЛН ЦУНАМИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ТОНГА В 2022 ГОДУ В ЯПОНСКОМ МОРЕ

Цуканова Е.С., Медведев И.П.

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: цунами, метеоцунами, Японское море, вулкан Тонга, извержение.

15 января в 4:15 UTC произошло извержение подводного вулкана Тонга-Хунга в юго-западной части Тихого океана, которое привело к возникновению волн цунами с различным механизмом возникновения. Первый механизм: “прямая” волна, вызванная непосредственно извержением. Вторым механизмом – “атмосферная” волна, появившаяся в результате взаимодействия уровня поверхности океана с атмосферными волнами Лэмба (резонанс Праудмана) [1], сгенерированными вулканическим извержением. Волны распространялись по всему Тихому океану (превышая высоту 1 м в некоторых пунктах) и были хорошо зафиксированы в окраинных морях, включая Японское море [2, 3]. В зависимости от происхождения, особенностей распространения и топографии оба типа волн по-разному влияли на колебания уровня Японского моря. В данной работе исследовано влияние каждого типа волн на изменение уровня в Японском море.

В работе были использованы данные давления с порталов КНОА, Sensor.Community и Weather Underground, а также данные международной системы мониторинга договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Для анализа записей уровня моря были использованы данные порталов КНОА, ИОС (UNESCO) и российской службы предупреждения цунами. Также были использованы записи глубоководных донных станций DART. В качестве батиметрии был использован массив базы данных GEBCO.

В результате статистического и спектрального анализа, а также численного моделирования распространения волн внутри и вблизи акватории Японского моря было выявлено, что на западном побережье Японских островов практически не было заметно влияние волн цунами, в отличие от побережья Южной Кореи и России. Высота волн на побережье России в Японском море составила от 10 до 44 см (Рудная пристань). На западном побережье Японии волна трудно определяется относительно уровня фонового длинноволнового шума, сгенерированного атмосферными процессами. Японское море является сильно изолированной акваторией, которая связана с Тихим океаном через несколько проливов. Особенности этих проливов, такие как ширина, глубина и геометрия в значительной мере влияют на проникновения длинных волн из Тихого океана [4]. Волны из Тихого океана проникают в море значительно быстрее через пролив Цугару, несмотря на его геометрию. На станцию Хамада, расположенную около Корейского пролива, волна через пролив Цугару приходит на несколько часов раньше. В настоящей работе были исследованы пропускные свойства основных проливов, соединяющих Японское море с акваторией Тихого океана. Проливы играют роль некоего низкочастотного фильтра, пропускающая волны с большими периодами и препятствуя проникновению высокочастотных волн, при этом значительно уменьшая их амплитуду. В открытом океане преобладающий период волн составляет 30-40 мин и 15-20 мин. Внутри акватории Японского моря преобладают волны цунами атмосферного происхождения с меньшими периодами. Только на одной станции было отмечено заметное влияние внешних волн (Рудная пристань), пришедших через пролив Лаперуза или Цугару.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2021-0004) и гранта МК-4168.2022.1.5.

Список литературы

- 1) Amores A. et al. Numerical Simulation of Atmospheric Lamb Waves Generated by the 2022

Hunga-Tonga Volcanic Eruption // Geophysical Research Letters. – 2022. – V. 49. – No. 6. – P. e2022GL098240.

- 2) Kubo H. et al. Ocean-wave phenomenon around Japan due to the 2022 Tonga eruption observed by the wide and dense ocean-bottom pressure gauge networks // Earth, Planets and Space. – 2022. – V. 74. – No. 1. – P. 1–11.
- 3) Imamura F. et al. Preliminary observations and impact in japan of the tsunami caused by the Tonga volcanic eruption on january 15, 2022 // Pure and applied geophysics. – 2022. – V. 179. – No. 5. – P. 1549–1560.
- 4) Tsukanova E., Medvedev I. The observations of the 2022 Tonga-Hunga tsunami waves in the Sea of Japan // Pure and Applied Geophysics. – 2022. – V. 179. – No. 12. – P. 4279–4299.

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И ПЛОЩАДИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

Цыпкин И.Ю., Подрезова Н.А.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Ледовитость, Баренцево море, Арктика.

Баренцево море относится к морям Северного Ледовитого океана, отличительной характеристикой которого является то, что его юго-западная часть всегда свободна ото льдов. Чаще всего в данном регионе преобладают льды местного происхождения, но в отдельные периоды могут регистрироваться дрейфующие льды с других морей Арктического бассейна. Однако, в последние годы наблюдаются заметные климатические изменения в Арктике (сокращение площади льдов, увеличение температуры воды и воздуха), которые должны находить отражение в гидрологическом режиме Баренцева моря. Такие условия формируют необходимость получения климатических оценок изменения температуры воздуха и площади ледяного покрова, что является целью данного исследования.

В работе использовались среднемесячные данные площади льда Баренцева моря базы данных NOAA/NCEI и температуры воздуха с сайта "Погода и климат" с ноября 1978 г. по декабрь 2021 г. [1,2]. Для исследования изменения температуры воздуха Баренцева моря были выбраны 3 станции - г. Мурманск, г. Баренцбург и остров Хейса (Земля Франца Иосифа). Полученные среднемесячные данные были осреднены по годам. Методика исследования заключалась в анализе межгодовой изменчивости характеристик и расчете тренда в программе MS Excel.

Анализ графиков изменчивости многолетних характеристик температуры воздуха показал, что наибольшие изменения температур воздуха отмечается на острове Хейса - за 10 лет температура воздуха там увеличивается в среднем на $1,7^{\circ}\text{C}$. На станции Баренцбург наблюдается похожая тенденция, здесь температура увеличивается за 10 лет в среднем на 1°C . В Мурманске наблюдаются наименьшие изменения температуры воздуха, $0,5^{\circ}\text{C}$ за десятилетие. Расчет линейных трендов показал, что на всех трех станциях температура воздуха за последние годы возрастает. Отметим, что тенденция к потеплению проявляется во все сезоны.

По результатам анализа характеристик площади льда было выявлено, что среднегодовая ледовитость Баренцева моря имеет большой размах вариации равный 500тыс.км^2 . Максимум площади льда приходится на 1982 год и составляет 617тыс.км^2 . Минимальная площадь льда наблюдается в 2016 году и составляет 117тыс.км^2 . Пространственный анализ показал, что преобладает образование однолетнего льда в море, старый же лед встречается только на крайнем севере [3]. Можно отметить, что за последние годы (2019 - 2021 гг.) площадь льда Баренцева моря несколько стабилизировалась и находится в пределах $229 - 245\text{тыс.км}^2$. Однако, анализ на масштабе десятилетий показал, что наблюдается существенное снижение площади льда, а также уменьшение размеров дрейфующего льда.

Сопоставляя данные по температуре воздуха и площади льда за 2016 год, можно отметить, что в этот год были зафиксированы максимальные значения среднегодовой температуры, а также наблюдалось минимальное значение площади льда. Вероятно, в указанный период интенсификация атмосферной циркуляции привела к увеличению транспорта теплого воздуха с Атлантического океана, что впоследствии сказалось на значительном сокращении ледяного покрова в Баренцевом море.

Таким образом, в рамках данного исследования были получены климатические оценки величин площади льдов и температуры воздуха в Баренцевом море. Показано, что температура воздуха в данном регионе продолжает увеличиваться, а площадь льда - сокращаться.

Список литературы

- 1) National Centers for Environmental Information. Available at: <https://www.ncei.noaa.gov> (Accessed 10.01.2022).
- 2) Погода и климат [сайт]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 10.01.2022).
- 3) Тейдер М.С., Оскотская С.А., Фролова Н.С., Подрезова Н.А. Межгодовое изменение льда Арктики. // В сборнике: Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах. Москва, 2021. С. 224-226.

РАСШИРЕНИЕ БЕЗЛЁДНОГО ПЕРИОДА В КАРСКОМ МОРЕ И МОРЕ ЛАПТЕВЫХ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Шабанов П.А.¹, Баранская А.В.²

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

² МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: безлёдный период, Карское море, море Лаптевых, морской лёд, изменения климата.

Вследствие изменений климата полярные береговые экосистемы становятся все более уязвимыми [1]. Динамика прибрежных зон Арктики в высокой степени связана с наблюдаемым сокращением площади морского ледяного покрова. В результате побережья с каждым годом все дольше подвергаются воздействию волн, штормов и штормовых нагонов. Продолжительность безлёдного периода становится ключевым параметром в рамках мониторинга береговых процессов и региональных климатических изменений в арктических морях [2, 3].

Характерное для XXI века стремительное сокращение площади морского льда в Северном Ледовитом океане наблюдается и в Карском море и в море Лаптевых. Так в среднем за декаду 2011-2020 гг. площадь льда в Карском море стала меньше на 14%, а в море Лаптевых на 23% по сравнению с климатическими среднемноголетними значениями за 1981-2010 гг. Активные изменения площади морского льда наблюдаются в период с июня по октябрь в море Лаптевых и с июня по ноябрь в Карском море. В остальные месяцы изменения практически отсутствуют. Общее и сезонное сокращение площади морского льда определяют увеличение продолжительности безлёдного периода. Это является важным фактором при планировании условий навигации, для оценки рисков проектирования и эксплуатации прибрежной и морской инфраструктуры.

Исследование уточняет региональные оценки продолжительности безлёдного периода (БЛП) в морях Северного Ледовитого океана, полученные по данным дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне из архива Национального центра льда и снега (США) NSIDC, за период 1979-2021 гг. [4]. На основе полученных оценок ежегодной очищаемости акваторий от морского льда для Карского и моря Лаптевых выделены районы с наименее надёжными оценками среднемноголетних характеристик и тенденций БЛП в прибрежной зоне. Для Карского моря это районы юго-западной части Байдарацкой губы, Обская губа, Тазовская губа, Гыданская губа, Енисейский залив. В море Лаптевых к районам относится Хатангский залив.

На основе данных о сплоченности морского льда архива NSIDC, G02202, version 3, были рассчитаны среднемноголетние значения дат начала и окончания безлёдного периода, а также общая продолжительность БЛП, получены оценки их тенденций за период 1979-2021 гг. Продолжительность безлёдного периода в Карском море и море Лаптевых в подавляющем числе районов статистически значимо увеличилась [5, 6]. Исключение - самые северные окраины обоих морей, севернее 77° с.ш., где общая ледовитость остаётся высокой. Показано, что прибрежная зона характеризуется более низкими темпами изменений характеристик БЛП, в том числе и продолжительности безлёдного периода. Так увеличение продолжительности БЛП в море Лаптевых оценивается в +14 сут/10 лет для открытых акваторий и +8 сут/10 лет для прибрежной зоны. Общая продолжительность безлёдного периода в обоих морях увеличилась как за счёт более позднего замерзания, так и за счёт более раннего оттаивания. Средние темпы смещений дат начала периода составляют -9 сут/10 лет для Карского моря и -8 сут/10 лет для моря Лаптевых. В целом темпы смещений дат окончания БЛП слабее, чем для дат начала БЛП, и составляют +7 сут/10 лет для Карского моря и +5 сут/10 лет для моря Лаптевых.

Представленный анализ расширяет представление о последствиях сокращения ледовитости в море Лаптевых и Карском море в современном климате. Его результаты могут быть использо-

ваны при формировании “дорожных карт”, сценариев устойчивого развития, а также в задачах рационального природопользования арктических регионов России.

Обработка данных, оценка темпов расширения безлёдного периода и ежегодной очищаемости от морского льда в море Лаптевых и Карском море были выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-77-10031 "Берега морей Российской Арктики: прошлое, настоящее, будущее". Сбор, актуализация, подготовка и валидация данных сплоченности морского льда для Карского моря и моря Лаптевых были выполнены Шабановым П.А. в рамках Госзадания ИО РАН (№ FMWE-2021-0003).

Список литературы

- 1) Ogorodov S., Aleksyutina D., Baranskaya A., Shabanova N., Shilova O. Coastal erosion of the russian arctic: An overview // *Journal of Coastal Research*. 2020. Vol. 95. P. 599–604
- 2) Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н.В., Репина И.А., Смирнов А. В. // Арктический ледяной покров становится сезонным? // *Исследование Земли из космоса*. 2013. № 4. С. 50–65
- 3) Bliss A.C., Steele M., Peng G. et al. // Regional variability of Arctic sea ice seasonal change climate indicators from a passive microwave climate data record // *Environmental Research Letters*. 2019. V. 14(4). 045003. P. 1–11
- 4) Meier W., Fetterer F., Savoie M. et al. // NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration, Version 3. [G02202]. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. doi: <https://doi.org/10.7265/N59P2ZTG>. 2017. [04.03.2022].
- 5) Шабанов П. А. Изменения продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря по спутниковым данным // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 4. С. 518–531
- 6) Shabanov P., Shabanova N. Ice-free period detection method in the Arctic coastal zone // *Russ. J. Earth. Sci.* 2020. V. 20. ES6016. doi:10.2205/2020ES000725

ОЦЕНКА ВОЗРАСТНОГО СОСТАВА ЛЬДОВ В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ В КОНЦЕ ЗИМНЕГО ПЕРИОДА

Шаратунова М.В., Иванов В.В.

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Восточно-Сибирское море, ледовые условия, возрастной состав льдов, припай, дрейфующий лед.

В зимний период важнейшей характеристикой ледового режима арктических морей является толщина льда. Существует пространственная неравномерность распределения льдов по возрастным характеристикам (толщине), связанная с климатическими и гидрометеорологическими условиями [1]. Учитывая то, что в ближайшее время планируется переход к круглогодичной навигации по восточному направлению Северного морского пути (СМП) для осуществления морских операций необходимо иметь точную информацию о возрастных характеристиках ледяного покрова.

Работа посвящена исследованию возрастного состава льдов в Восточно-Сибирском море. Ледовые условия в западной и восточной частях моря различаются между собой и имеют свои особенности. В западной части моря и в Новосибирских проливах находятся льды преимущественно местного происхождения. Ледяной покров в восточной части состоит из вновь образовавшихся льдов, остаточных и многолетних, принесенных из Арктического бассейна [2].

В качестве исходных данных использовались цифровые региональные ледовые карты Центра «Север» ГНЦ «ААНИИ» за период 1997-2022 гг., с октября по май, с декадной дискретностью. В основе методики лежит вычисление площади однородной ледовой зоны определенного возраста (в км²) средствами ГИС-технологий с дальнейшим ее приведением к величине % от общей площади ледяного покрова моря. Границы исследуемых морей и их площади приведены в пособии «Границы океанов и морей» [3].

Подобные исследования по изучению возрастного состава льдов арктических морей были ранее опубликованы и другими авторами [4,5].

В рамках этой работы получены характерные распределения дрейфующего и припайного льдов различного возраста для Восточно-Сибирского моря, а также для локального района моря (район 23), расположенного в восточной части, в соответствии с Правилами плавания в акватории Северного морского пути [6].

В западной части моря однолетние тонкие льды (30-70 см) переходят в градацию однолетних средних льдов (70-120 см) в середине декабря; однолетние средние в градацию однолетних толстых льдов (более 120 см) – в конце января. В восточной части – переход однолетних тонких в градацию однолетних средних льдов происходит в конце декабря; однолетние средние переходят в градацию однолетних толстых льдов – в конце февраля.

При сравнительном анализе возрастного состава льда в восточной части моря и отдельного района (район 23) получилось, что на момент ледообразования количество остаточного льда в локальном районе составило 15%, что в два раза меньше, чем во всей восточной части (в среднем 30%).

В середине ноября в локальном районе количество молодого льда быстро увеличивается и достигает своего максимума 57%, для всей восточной части это значение составляет 42%. Переход льдов в стадию однолетние тонкие происходит равномерно для всей восточной части моря со второй половины ноября (максимальное значение в середине декабря 50%). В локальном районе 23 однолетние средние льды преобладают со второй декады января (максимум 62% в начале февраля), что на одну декаду позже, чем на всем востоке моря (в конце января более 50%).

Таким образом, переход от средних льдов к толстым в локальном районе происходит позже на одну декаду (в процентном соотношении значения близки 30-35%). К середине мая на отдельных

участках и во всей восточной части моря толстые льды достигают своего максимума около 50%.

Следовательно, здесь подтверждается пространственная неравномерность распределения ледяного покрова по возрасту. Оценка возрастного состава ледяного покрова к концу зимнего периода (в мае) показала преобладание однолетнего толстого льда в дрейфующих и припайных льдах.

Полученные данные о возрастном составе льдов в Восточно-Сибирском море в зимний период дополняют режимные характеристики и позволяют оценить ледовые условия для обеспечения безопасности плавания судов по трассе СМП.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы Росгидромет НИТР 5.1, ААНИИ 05 26 25, 2020-2024 гг.

Список литературы

- 1) Моря Российской Арктики в современных климатических условиях. СПб, ААНИИ, 2021. 360 с.
- 2) Карелин И.Д. Карклин В.П. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX- началеXXI века. СПб, ААНИИ, 2012. 180 с.
- 3) Границы океанов и морей. СПб.: ГУНиО МО РФ, 2000. 206 с.
- 4) Хотченков С.В. Формирование возрастного состава ледяного покрова в море Лаптевых// Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. №4(114). С.5-15
- 5) Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М. Сезонные изменения возрастного состава льдов в северо-восточной части Карского моря в осенне-зимний период// Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. №4(110). С.41-50
- 6) Правила плавания в акватории Северного морского пути. Москва, 2020. 34 с.

СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ АЗОВСКОГО МОРЯ: НАБЛЮДЕНИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Ширыборова А.И.^{1,2}, Медведев И.П.², Архипкин В.С.¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: сейши, собственные колебания, спектральный анализ, задача на собственные значения.

Азовское море является одним из самых изолированных морей Мирового океана и в некотором приближении может считаться замкнутым, а также это самое мелководное море – его максимальная глубина составляет 13.5 м, и, как следствие, в нем хорошо развиты сейшевые колебания. Некоторые исследователи считают сейши основным видом колебаний уровня Азовского моря [1]. На данный момент существует большое количество современных работ, посвященных сейшевым колебаниям уровня Азовского моря, но большинство из них основаны на численном моделировании [2]. Последние подробные исследования, посвященные изучению сейшевых колебаний Азовского моря и основанные на данных натурных наблюдений за уровнем моря были опубликованы более 90 лет назад [3, 4].

В данной работе были использованы данные наблюдений на 14 прибрежных гидрометеорологических пунктах Азовского моря, взятые с сайта Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом Океане (см. таблицу [5]). Для оценки влияния смежного бассейна Черного моря на формирование колебаний уровня Азовского моря дополнительно были использованы длительные ряды наблюдений в Туапсе (1982-1995 гг.) и Феодосии (1982-1995 гг.).

Было выполнено два вида численного моделирования: решение задачи на собственные значения [6] и диагностическое гидродинамическое моделирование. Для решения задачи на собственные значения использовалась расчетная сетка, охватывающая район от $45^{\circ} 15'$ до $47^{\circ} 25'$ с.ш. и от $34^{\circ} 30'$ до $39^{\circ} 45'$ в.д., с шагом 1 км по широте и по долготе. В результате получилась матрица размером 362×227 . В Керченском проливе на жидкой границе была задана узловая линия. Вычислялись восемь первых мод сейшевых колебаний. В качестве гидродинамической модели использовалась двумерная версия Принстонской модели океана (POM). В Керченском проливе была задана стенка. Расчетная сетка имела равномерный шаг по широте и по долготе – 0.01° , основанной на батиметрии GEBCO. На вход подавались поля ветра на высоте 10 м за период времени с 1980 по 1985 гг. из атмосферного реанализа NCEP/CFSR, а также синтетически сгенерированные поля ветра, спектр которого имеет характер красного шума.

Многолетние ряды ежечасных наблюдений за уровнем Азовского моря позволили качественно произвести спектральный анализ и выделить периоды собственных колебаний бассейна с высокой точностью – практически на всех прибрежных станциях были отмечены следующие периоды: 22.5, 14.1, 6.7, 3.2 ч. Взаимный спектральный анализ позволил оценить их пространственную структуру – выдвинуто предположение о наличии узловой линии на входе в Таганрогский залив и колебаниях юго-западной и северо-восточной частей акватории в противофазе. Помимо этого, была установлена несвязность колебаний Азовского и Черного морей на частотах более 1.3 цикл/сут.

Результаты численного моделирования, основанного на решении задачи на собственные значения [6], дали следующие периоды собственных колебаний бассейна: 23.5, 13.9, 11.2, 9.6, 8.7, 7.5, 6.6, 5.8 ч. Несколько периодов практически совпадают с периодами, выделенными по спектрам ранее. Пространственная структура практически всех мод характеризуется максимумами колебаний уровня моря в вершинах заливов и лиманов таких, как Таганрогский, Утлюкский и Ахтарский. Чем выше мода колебаний, тем большее значение имеют небольшие заливы, лиманы и косы.

Численное моделирование с помощью Принстонской модели океана с использованием ветра и давления из реанализа и с использованием случайного ветра, спектр которого имеет характер красного шума, дали немного различающиеся на низких частотах периоды: 24.2, 14.7, 9.9, 3.4 ч в первом случае и 25.3, 14.6, 10.8, 7.6, 5, 3.7 ч во втором случае. Имеющиеся незначительные различия с предыдущим моделированием в периодах могут быть объяснены учетом в Принстонской модели океана вращения Земли. Распределение амплитуд и фаз основных сейшевых мод имеет в Азовском море форму приливных амфидромий, типичных для прилива (см. [5]). В целом для всех трех экспериментов расположение узловых линий и узловых точек первых мод довольно близкое. Также везде с увеличением номера моды растет значение локальных особенностей батиметрии и береговой линии, а также количества узловых точек/линий.

Отсутствие в спектрах, рассчитанным по данным наблюдений, некоторых периодов собственных колебаний говорит о слабом проявлении соответствующих мод в реальных природных условиях.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2021-0004) и гранта МК-4168.2022.1.5.

Список литературы

- 1) Матишов Г.Г., Инжебейкин Ю.И. Численные исследования сейшевых колебаний уровня Азовского моря // *Океанология*. – 2009. – Т. 49. – № 4. – С. 485–493
- 2) Демьшев С.Г., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я. Анализ влияния постоянного ветра на скорость течений и сейшевые колебания уровня Азовского моря // *Метеорология и гидрология*. – 2017. – № 6. – С. 46–54
- 3) Курчатова И.В. Сейши в Черном и Азовском морях // *Изв. Центр. гидромет. бюро ЦУМОРТа*. 1925. Вып. 4. С. 149–158
- 4) Endros A. Die Seiches des Schwarzen und Azowschen meers und die dortigen Hubhohen der Gezeiten // *Ann. Hyd. Mar. Met.*–1932.–Bd. – 1932. – V. 60. – P. 442–453
- 5) Корженовская А.И., Медведев И.П., Архипкин В.С. Приливные колебания уровня Азовского моря // *Океанология*. – 2022. – Т. 62. – № 5. – С. 677–689
- 6) Архипкин В.С., Иванов В.А., Николаенко Е.Г. Моделирование баротропных сейш в южных морях // *Моделирование гидрофизических процессов и полей в замкнутых водоемах и морях*. М.: Наука, 1989. С. 104–117

ПРИЛИВНЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ КАЛИФОРНИЙСКОГО ЗАЛИВА

Ширыборова А.И.^{1,2}, Медведев И.П.², Архипкин В.С.¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: приливы, гармонический анализ, гармоники, спектральный анализ, гидродинамическая модель.

Исследование приливных колебаний уровня Калифорнийского залива является актуальным по ряду причин. Во-первых, на данный момент собраны многолетние качественные ряды данных об уровне моря, на основе которых можно провести подробный анализ колебаний всего залива. Современные работы часто рассматривают отдельно только части Калифорнийского залива, но не весь залив целиком [1, 2]. Во-вторых, благодаря его форме можно предположить, что в нем, как и в Адриатическом море, может наблюдаться резонансное усиление приливов [3].

В работе использовались длительные ежечасные данные наблюдений на 18 прибрежных пунктах измерения уровня моря Калифорнийского залива, которые были взяты с сайта University of Hawaii SEA LEVEL CENTER (UHSLC). Для обработки данных и получения необходимых результатов использовались гармонический и спектральный анализы.

Амплитуды и фазы основных приливных гармоник оценивались с помощью гармонического анализа приливов для отдельных годовых серий уровня моря с последующим векторным осреднением за весь период наблюдений. Подобный подход позволяет улучшить точность амплитуд и фаз исследуемых гармоник. Максимальный рассчитанный размах приливных колебаний составляет 6.9 м и наблюдается на станции Сан-Фелипе вблизи вершины залива. Полусуточная гармоника M_2 имеет амплитуды от 0.13 до 1.6 м в вершине залива, S_2 от 0.1 до 0.9 м. Суточная гармоника K_1 – от 0.16 м на входе в залив до 0.4 м в вершине, O_1 – от 0.1 до 0.25 м. Характер прилива меняется от смешанного преимущественно полусуточного на входе в залив до смешанного преимущественно суточного в его вершине.

Результаты гармонического и спектрального анализов показывают, что в заливе преобладает полусуточный прилив, а спектральный анализ с высоким разрешением показывает наличие мелководных гармоник, существенно превышающих уровень шума. Спектральный анализ с высоким разрешением позволяет на основе длительных рядов наблюдений выделить из суточных и полусуточных пиков отдельные приливные составляющие и второстепенные гармоники. Спектральный анализ позволил выделить периоды собственных колебаний залива и его отдельных частей.

Также было проведено моделирование приливных колебаний с помощью гидродинамической модели ADCIRC за 1973 год. На основе массива глубин GEBCO была подготовлена расчетная сетка. На открытой границе задавались значения гармонических постоянных M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 из глобальной приливной модели FES2014. По данным моделирования максимальный размах прилива составляет 8 м и наблюдается в вершине залива. Расхождения в значениях максимального размаха между моделированием и данными натурных наблюдений обусловлены различием географического положения узлов вычислительной сетки и береговых мареографов.

Список литературы

- 1) Filonov A. E., Lavín M. F. Internal tides in the Northern Gulf of California //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2003. – Т. 108. – №. С5.
- 2) Zaytsev O., Rabinovich A. B., Thomson R. E. et al. Intense diurnal surface currents in the Bay of La Paz, Mexico //Continental Shelf Research. – 2010. – Т. 30. – №. 6. – С. 608-619

- 3) Medvedev I. P., Vilibić I., Rabinovich A. B. Tidal resonance in the Adriatic Sea: Observational evidence // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2020. – T. 125. – №. 8. – C. e2020JC016168

АНАЛИЗ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Шишкова П.О., Медведев И.П.

Институт океанологии П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: Балтийское море, короткопериодные колебания, сгонно-нагонные явления.

Балтийское море является полузамкнутым водоемом. Колебания уровня Балтийского моря в различных диапазонах периодов достаточно хорошо изучены. Величина приливных колебаний уровня в море не превышает 20 см. Изменения ветра над акваторией моря вызывают сильные сгонно-нагонные колебания уровня внутри бассейна. В вершине Финского залива высота штормовых нагонов достигает более 3-4 м [1]. Если нагоны и приливы в Балтийском море хорошо изучены, то особенности короткопериодных колебаний уровня (с периодами меньше 6 ч) в акватории Балтийского моря – открытый вопрос, требующий дополнительных исследований. Короткопериодные колебания уровня в Балтике различаются в зависимости от морфологии заливов, бухт и каналов. Колебания с периодами менее 6 часов в данном регионе остаются гораздо менее изученными в силу необходимости анализа длинных временных рядов с высоким временным разрешением (1-10 мин).

В работе были проанализированы данные о состоянии уровня моря с 25 станций шведской системы сбора морской информации SMHI, покрывающих целиком восточное побережье Швеции. Временное разрешение варьировалось от одной до пяти минут в зависимости от конкретной станции, а длина рядов – от одного до пяти лет. С помощью пакета *ttide* данные были очищены от приливной компоненты, также ряды были отфильтрованы от очевидных выбросов. Далее за каждый день были выбраны максимальные значения уровня, после чего дни с аномально высоким или низким уровнем относительно соседних дней были рассмотрены отдельно. Также было посчитано количество таких аномалий в зависимости от времени года. Цель работы: обнаружить и классифицировать короткопериодные колебания у западного берега Балтийского моря, а также оценить их статистические характеристики.

По результатам обработки были выбраны некоторые колебания, обозначенные как экстремальные для акватории. Для каждого отдельного пункта были определены доминирующие периоды этих колебаний и их максимальные высоты. Были сделаны выводы о повторяемости таких колебаний на протяжении нескольких лет, а также о сезонной повторяемости. Полученные выводы были также сравнены с результатами работы [2], где изучались экстремальные короткопериодные колебания у берегов Финляндии.

Список литературы

- 1) Медведев И.П., Рабинович А.Б., Куликов Е.А. Приливные колебания в Балтийском море // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 5. С. 596–611.
- 2) Pellikka H., Šepić J., Lehtonen I., Vilibić I. Meteotsunamis in the northern Baltic Sea and their relation to synoptic patterns // *Weather and Climate Extremes*. 2022.

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ТЕРМОХАЛИННОГО РЕЖИМА В ЗАЛИВЕ БЛАГОПОЛУЧИЯ КАРСКОГО МОРЯ

Щука А.С., Щука С.А., Недоспасов А.А., Замятин И.А., Кременецкий В.В.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: Карское море, Новая Земля, термохалинная структура, динамика вод, многолетние исследования.

Морфологическая особенность многих заливов Новой Земли (Благополучия, Цивольки, Степового и др.) заключается в наличии относительно глубокой котловины в центральной части залива и поднятий, а в некоторых случаях островов, на входе в залив. Залив Благополучия – фьордообразный залив Карского моря на восточном берегу Северного острова Новой Земли. В центральной части залива расположена котловина, максимальная глубина которой составляет более 170 м. Залив частично изолирован от акватории Карского моря островом Камни, расположенном на входе в залив. По имеющимся батиметрическим картам максимальная глубина западного прохода не превышает 37 м, а восточного – доходит до 57 м.

Залив Благополучия наиболее изученный нами залив. За 15 лет проведено 8 экспедиционных съемок (2007, 2016, 2017, 2018, 2020, 2022 гг. - экспедиции на НИС «Академик Мстислав Келдыш»; 2013, 2014 гг. – экспедиции на НИС «Профессор Штокман»). Гидрофизические измерения выполнялись океанографическими зондами SBE 911plus, SBE 19plus. Следует отметить, что характер многолетнего распределения гидрологических характеристик залива Благополучия оставался неизменным все эти годы, за исключением 2007 и 2022 годов.

Основным источником поступления пресных вод в залив Благополучия является водоток из бухты Укромная и реки на северо-востоке. При этом сильно опресненный слой занимает верхние десятки сантиметров. Как известно, важной особенностью гидрологической структуры Карского моря является наличие поверхностного опресненного слоя (ПОС), сформированного речным стоком, в основном Оби и Енисея. Распространение речных вод зависит, главным образом, от объема стока и ветровых условий. Принято выделять три типа распространения речных вод: западный, восточный и центральный. При западном типе распространения опресненные воды могут достигать восточного берега Северного острова Новой Земли.

Многолетние исследования показали, что все изменения термохалинных характеристик во время наших наблюдений в 2007-2020 гг. происходили в верхнем 15-метровом слое. Минимальные значения солености на горизонте 1 м во всех районах залива и прибрежной части моря в ходе многолетних исследований менялись следующим образом:

- 13-15.09.2007 – $S = 15.583$ епс (рейс АМК-54);
- 13-16.09.2013 – $S = 30.129$ епс (рейс ПШ-128);
- 29-31.08.2014 – $S = 29.498$ епс (рейс ПШ-129);
- 31.07-02.08.2016 – $S = 30.346$ епс (рейс АМК-66);
- 25-26.09.2017 – $S = 29.561$ епс (рейс АМК-69);
- 09-11.09.2018 – $S = 32.857$ епс (рейс АМК-72);
- 07-10.09.2020 – $S = 27.063$ епс. (рейс АМК-81);

Ниже горизонта 15 м соленость превышала 33 епс.

Впервые, в 2022 году, в наших исследованиях наблюдалось уникальное мощное поступление Обско-Енисейских вод в залив Новой Земли. Так, измерения 24-27.09.2022 г. показали, что в залив Благополучия теплый слой достигал глубины 35 м, низкие солености – 25 м. Для сравнения с предыдущими годами - минимальная соленость на горизонте 1 м на входе в залив Благополучия была 24.421 (на горизонте 0.6 м - 20.517 епс) и повышалась в его кутовой части до 24.948 епс.

Схожая гидрологическая структура вод на входе в залив и вне его позволяет сделать вывод, что воды ПОС могут не только достигать берегов Новой Земли, но и поступать в залив. Проведённые исследования подтвердили выводы, сделанные в [1-3], что заливы восточного берега Новой Земли, несмотря на наличие входного бара, могут интенсивно обмениваться водами с Карским бассейном. Анализ данных указывает на относительно свободное горизонтальное перемешивание вод залива с прибрежными водами на глубинах до 60–70 м. Однако, более сильная стратификация вод внутри залива, по-видимому, может создавать некоторые препятствия для водообмена с открытой частью моря.

Для заливов Новой Земли, включая залив Благополучия, изучение водообмена с открытым морем имеет особое значение в связи с наличием затопленных радиоактивных объектов, а также потенциальной возможностью накопления в них загрязняющих веществ, в том числе радионуклидов, которые могут поступать сюда с береговым стоком или эоловым переносом с участков суши, где в 50-е–80-е годы происходили испытания ядерного оружия.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания FMWE-2021-0002.

Список литературы

- 1) Степанова С.В., Недоспасов А.А. Особенности гидрофизического и гидрохимического режимов залива Благополучия (Новая Земля) // Океанология. 2017. Том 57. № 1. С. 75–85
- 2) Дубинина Е.О., Коссова С.А., Мирошников А.Ю., Фяйзуллина Р.В. Изотопные (D, ^{18}O) параметры и источники опресненных вод Карского моря // Океанология. 2017. Том 57. № 1. С. 38–48
- 3) Коссова С.А., Дубинина Е.О., Мирошников А.Ю., Флинт М.В. Применение дейтериевого эксцесса для идентификации источников опреснения в заливах архипелага Новая Земля // Доклады академии наук. 2019. Том 487. № 2. С. 212–216

ИЗМЕНЕНИЕ ПОТОКОВ ТЕПЛА ОКЕАН-АТМОСФЕРА И СКОРОСТИ ВЕТРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ИНТЕНСИВНОСТИ АМОЦ

Яковлева Д.А.^{1,2}, Башмачников И.Л.^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: АМОЦ, потоки тепла океан-атмосфера, скорость ветра, Северная Атлантика, Субполярный круговорот.

В данной работе стоит задача выявить районы усиления/ослабления потоков тепла океан-атмосфера и районы усиления/ослабления модуля скорости ветра в период высоких и низких значений индекса Атлантической меридиональной океанической циркуляции (АМОЦ) в регионе Северного Ледовитого океана и севера Северной Атлантики. Данное исследование было проведено для выявления возможных причин и/или следствий изменчивости АМОЦ.

Верхняя ветвь АМОЦ представляет собой поток теплых и соленых вод в субполярные районы с Северо-Атлантическим течением [1]. Этот поток далее делится на две ветви – течение Ирмингера и Норвежское течение, с которыми происходит перераспределение вод между Субполярным круговоротом и Северо-Европейским бассейном. Нижняя ветвь (возвратный глубинный поток АМОЦ) формируется в районах глубокой конвекции, где зимой происходит сильная потеря тепла океаном. Основные районы глубокой конвекции – моря Ирмингера, Лабрадор, а также Гренландское море.

Температура воды верхнего 100-метрового слоя получена по данным океанического реанализа ORAS4 (Ocean ReAnalysis System 4, 1958–2017 гг.), который основан на океанической модели NEMO V3.0 с пространственным разрешением $1 \times 1^\circ$ [2]. Меридиональная и зональная скорости ветра и потоки тепла океан-атмосфера (скрытый и явный) были получены по данным реанализа ERA-5 (1958-2021 гг.) с пространственным разрешением $0.25 \times 0.25^\circ$. Интенсивность Атлантической меридиональной океанической циркуляции за весь период наблюдений характеризовалась ансамблевым индексом АМОЦ, который был рассчитан по двум соленостным и одному температурному индексу [3, 4].

По значениям нормированного индекса АМОЦ были выбраны два периода высоких и низких значений АМОЦ: годы, когда индекс превышал 0.5 и когда был меньше -0.5. Для двух данных периодов были рассчитаны средние значения суммы скрытого и явного потоков тепла и модуля скорости ветра по всему району исследования и получены аномалии (как разность потоков тепла океан-атмосфера и модуля скорости ветра в годы высоких значений АМОЦ и в годы низких значений АМОЦ). По пространственному распределению аномалий получено, что в годы высокого индекса АМОЦ происходит увеличение температуры воды верхнего 100-метрового слоя: наиболее сильно в районе субполярного круговорота – на 1.5°C , слабее в районе Норвежского течения – на 0.5°C по сравнению с низкими значениями индекса АМОЦ. При высоком индексе АМОЦ происходит уменьшение модуля скорости ветра, в среднем, примерно на 1 м/с в тех же районах – над Субполярным круговоротом и Норвежским течением. Можно предположить, что увеличение температуры воды в данных районах связано с уменьшением скорости ветра в годы высокого индекса АМОЦ. Уменьшение температуры воды верхнего 100-метрового слоя и увеличение модуля скорости ветра в годы высокого индекса АМОЦ наблюдается в районе Гренландского моря, в районе архипелага Шпицберген и архипелага Новая Земля.

Наибольшее увеличение потока тепла из океана в атмосферу в годы высокого индекса АМОЦ также происходит в районе Субполярного круговорота (в юго-восточной части моря Лабрадор,

к югу от южной оконечности Гренландии, в Северо-Атлантическом течении), к западу от архипелага Шпицберген и к западу от архипелага Новая Земля в Баренцевом море. Аномалии могут превышать 15 Вт/м^2 . В это же время уменьшение потоков тепла из океана в атмосферу наблюдается в северо-восточной части моря Лабрадор, южнее о. Исландия и в районе Норвежского течения.

При высоком индексе АМОЦ также усиливается поток теплых атлантических вод в Северной Атлантике, что также способствует увеличению температуры верхнего слоя Субполярного круговорота и Норвежского течения. Эта тенденция противоположна тенденции к усилению выхолаживания верхнего слоя Субполярного круговорота при увеличении скорости северных ветров в этом районе.

Публикация выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГУ № 94033410.

Список литературы

- 1) Srokosz M., Baringer M., Bryden H. et al. Past, present, and future changes in the Atlantic meridional overturning circulation // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2012. – V. 93. – No. 11. – P. 1663-1676.
- 2) Balmaseda M.A., Mogensen K., Weaver A.T. Evaluation of the ECMWF ocean reanalysis system ORAS4 // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2013. – V. 139. – № 674. – P. 1132–1161.
- 3) Chen X., Tung K.K. Global surface warming enhanced by weak Atlantic overturning circulation // *Nature*. – 2018. – V. 559. – № 7714. – P. 387–391.
- 4) Caesar L., Rahmstorf S., Robinson A. et al. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation // *Nature*. – 2018. – V. 556. – № 7700. – P. 191–196.

ТРОФИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ ЩЕТИНКОЧЕЛЮСТНЫХ БАРЕНЦЕВА МОРЯ В
УСЛОВИЯХ ПОЛЯРНОЙ НОЧИ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА
СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ АЗОТА ($\delta^{15}\text{N}$)

Артемьев Г.М.¹, Захаров Д.В.², Баталин Г.А.¹, Гареев Б.И.¹, Мингазов Г.З.¹,
Сабиров Р.М.¹, Голиков А.В.³

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

²Зоологический институт РАН, г. Санкт-Петербург

³Центр исследований океана Гельмгольца, г. Киль, Германия

Ключевые слова: Chaetognatha, щетинкочелюстные, трофическая экология, анализ стабильных изотопов, полярная ночь, Баренцево море.

Щетинкочелюстные (Chaetognatha), или морские стрелки, занимают важное место в пелагических пищевых цепях Арктики. Считается, что они ведут хищный образ жизни и оказывают большое воздействие на структуру и динамику местных зоопланктонных сообществ [1]. В настоящее время такая точка зрения оспаривается рядом исследователей, которые предполагают для них альтернативные источники питания. В частности, для некоторых арктических хетогнат допускается факультативная детритофагия [2], которую можно рассматривать как адаптацию к обитанию в олиготрофной полярной среде.

Изотопный анализ широко применяется для исследования трофических взаимодействий в разных экосистемах [3]. Он позволяет узнать состав ассимилированной диеты и определить питание в долгосрочном аспекте. Соотношения изотопов азота ($\delta^{15}\text{N}$) подвергаются фракционированию в ходе метаболических процессов, что приводит к закономерному обогащению консументов тяжелыми изотопами на каждом трофическом уровне. Это позволяет определять действительный трофический статус организма, что особенно важно в случае сложных арктических пищевых цепей.

В настоящей работе мы использовали анализ стабильных изотопов азота, чтобы выявить особенности трофической экологии трех наиболее массовых видов щетинкочелюстных Баренцева моря в условиях полярной ночи. Впервые мы предоставляем данные по влиянию размеров тела и глубины обитания на их трофический статус.

Материалом для исследования послужили траловые съемки, проводимые ПИНРО в ходе четырех рейсов в акватории Баренцева моря на НИС М-0102 “Вильнюс” и М-0662 “Фритъоф Нансен” в ноябре и декабре 2013 и 2014 годов. Для целей изотопного анализа были выбраны пробы с 14 станций с разными глубинами (218 – 921 м.) и отобраны представители трех видов хетогнат: *Parasagitta elegans* (175 экз.), *Eukrohnia hamata* (175 экз.) и *Pseudosagitta maxima* (33 экз.). Все отобранные экземпляры были замерены с точностью до миллиметра, после чего промыты от формалина и высушены в термостате при температуре 60 °С. В дальнейшем они были исследованы с использованием элементного анализатора Flash HT, соединенного через интерфейс ConFlo IV с изотопным масс-спектрометром Delta V Plus (Thermo Fisher Scientific).

Трофические уровни (TL) хетогнат были выведены с использованием двух уравнений, классического [3] и шкалированного [4]. За основу пищевой цепи в баренцевоморской пелагиали были приняты копеподы-фильтраторы *Calanus glacialis* и *C. finmarchicus*, которые предположительно соответствуют второму трофическому уровню ($\text{TL}_{\text{baseline}} = 2$). Для сравнения полученных результатов с литературными данными, применялись все известные факторы трофического обогащения азотом (TEF), а именно: классический (3.4‰), повышенный (3.8‰) и шкалированный. Поскольку

они не показали существенной разницы, далее значения TL будут приводиться исходя из классического TEF = 3.4‰.

По данным изотопного анализа, *P. elegans*, *E. hamata* и *P. maxima* имели статистически значимые различия в соотношениях изотопов азота и трофических уровнях (Mann-Whitney U test, $p < 0.01$, adj. method: bonferroni). Кроме того, регрессионный анализ выявил разный характер отношений их трофического статуса к размерам тела и глубине станций. Полученные результаты можно обобщить в следующем виде (значения $\delta^{15}\text{N}$ и TL приводятся в виде средних \pm стандартная ошибка среднего):

Parasagitta elegans это эврибатный, преимущественно эпипелагический вид, который обладает самым высоким трофическим статусом ($\delta^{15}\text{N} = 10.8 \pm 0.1$; TL = 2.7 ± 0.0). По отношению к размерам тела он показывает слабую отрицательную взаимосвязь для TL ($R^2 = 0.05$, $p < 0.01$) и отсутствие взаимосвязи для $\delta^{15}\text{N}$ ($R^2 = 0$, $p > 0.05$). По отношению к глубине станций наблюдается отсутствие взаимосвязи для TL и $\delta^{15}\text{N}$ ($R^2 = 0$, $p > 0.05$).

Pseudosagitta maxima это эврибатный, преимущественно мезопелагический вид, который обладает промежуточным трофическим статусом ($\delta^{15}\text{N} = 9.4 \pm 0.2$; TL = 2.4 ± 0.1). По отношению к размерам тела он показывает положительную взаимосвязь для TL ($R^2 = 0.19$, $p < 0.01$) и $\delta^{15}\text{N}$ ($R^2 = 0.15$, $p < 0.05$). По отношению к глубине станций наблюдается отсутствие взаимосвязи для TL и $\delta^{15}\text{N}$ ($R^2 = 0$, $p > 0.05$).

Eukrohnia hamata это эврибатный, преимущественно мезопелагический вид, который обладает самым низким трофическим статусом ($\delta^{15}\text{N} = 8.4 \pm 0.1$; TL = 2.1 ± 0.0). По отношению к размерам тела он показывает отсутствие взаимосвязи для TL и $\delta^{15}\text{N}$ ($R^2 = 0$, $p > 0.05$). По отношению к глубине станций наблюдается отсутствие взаимосвязи для TL ($R^2 = 0$, $p > 0.05$) и отрицательная взаимосвязь для $\delta^{15}\text{N}$ ($R^2 = 0.51$, $p < 0.01$).

На основании этих данных мы предполагаем, что в период полярной ночи три изученных вида щетинкочелюстных реализуют разные трофические стратегии. Поскольку их вертикальное распределение во многом перекрывается, использование разных пищевых ресурсов может значительно уменьшать межвидовую конкуренцию. Среди них только эпипелагическая *P. elegans* обладает относительно высокими трофическими уровнями, подтверждающими ее хищный образ жизни. Для мезопелагических *P. maxima* и *E. hamata* характерны более низкие трофические уровни, что может указывать на использование дополнительных источников питания, таких как детрит. Дальнейшие исследования разнообразия трофических стратегий хетогнат в разных районах Мирового океана помогут более точно установить их роль в пищевых цепях морских экосистем, а также в потоках вещества и энергии в пелагиали.

Список литературы

- 1) Sameoto D.D. Vertical distribution and ecological significance of chaetognaths in the Arctic environment of Baffin Bay // Polar Biology. – 1987. – Т. 7. – №. 6. – С. 317-328.
- 2) Grigor J.J. et al. Non-carnivorous feeding in Arctic chaetognaths // Progress in Oceanography. – 2020. – Т. 186. – С. 102388.
- 3) Post D.M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions // Ecology. – 2002. – Т. 83. – №. 3. – С. 703-718.
- 4) Hussey N.E. et al. Rescaling the trophic structure of marine food webs // Ecology letters. – 2014. – Т. 17. – №. 2. – С. 239-250.

ХЕМОСИМБИОТРОФНЫЕ ДВУСТВОРЧАТЫЕ МОЛЛЮСКИ *CALYPTOGENA PACIFICA* (*BIVALVIA: VESICOMYIDAE: PLIOCARDIINAE*) В РАЙОНЕ МЕТАНОВЫХ ВЫХОДОВ БЕРИНГОВА МОРЯ: ГЕНЕТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И СВЯЗЬ С ПОПУЛЯЦИЯМИ ВОСТОЧНОЙ ПАЦИФИКИ

Белов Д.А., Кременецкая А.В., Крылова Е.М.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: молекулярный анализ, COI, восстановительные биотопы, связь популяций, *Pliocardiinae*, двустворчатые моллюски.

Двустворчатые моллюски подсемейства *Pliocardiinae* (*Vesicomylidae*) представляют собой группу морских организмов, живущих в симбиозе с сульфид-окисляющими бактериями. Бактерии локализованы в клетках жабр и являются основным, если не единственным, источником питания моллюсков. Для жизнедеятельности бактерий необходимы сульфиды, доступ к которым на дне океана имеется в биотопах, называемых восстановительными. Такие биотопы развиваются в условиях горячих источников (гидротермы), холодных метановых выходов и скоплений разлагающейся органики (скелеты китов и др.). Эти пригодные для жизни плиокардиин местообитания резко отличаются от фоновой среды по физико-химическим условиям, обычно невелики по размерам и разделены протяженными пространствами, в которых моллюски не могут существовать. В результате, распространение плиокардиин носит фрагментированный, или «островной» характер, при котором метапопуляция состоит из отдельных локальных популяций. Вопросы о том, в какой степени локальные популяции связаны между собой, каким образом поддерживаются генетические связи и какие факторы влияют на поддержание единства пространственно удаленных локальных популяций, являются одними из актуальных в биогеографии фауны восстановительных сообществ.

Calypptogena pacifica Dall, 1891 – широко распространенный вид, населяющий восстановительные местообитания вдоль континентального склона восточной Пацифики от пролива Диксон-Энтрэнс на севере до полуострова Калифорнии на юге в диапазоне глубин от 361 до 2423 м. В западной Пацифике вид отмечен в Беринговом море на вулкане Пийпа (470-490 м) [1] и на Корякском склоне (400-695 м) [2]. В этой работе мы впервые представляем данные генетического исследования популяции *C. pacifica* с Корякского склона.

Материал был получен в 82 рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в 2018 году из биотопа метановых выходов с глубин 660-690 м. Моллюски были собраны сачком с помощью манипулятора телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) «Команч-18». Фрагменты аддукторов и ноги фиксировали с помощью 96% охлажденного этанола и хранили при -20°C. Были исследованы последовательности цитохром с-оксидазы субъединицы 1 (COI) у 26 экземпляров калиптоген. Для выделения ДНК использовали набор QuickExtract™ DNA Extraction Solution (Lucigen). Амплификация методом ПЦР была проведена с помощью набора Encyclo Plus PCR kit (Евроген). Для амплификации использовали праймеры VesHCO и VesLCO [3]. Полученные последовательности были отредактированы с помощью программ CodonCode Aligner (Codon Code Corporation) и Geneious® 7 (Invitrogen Corporation) и проверены на предмет возможных контаминаций с помощью BLAST (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>). Отредактированные последовательности были выровнены с использованием алгоритма MAFFT v. v7.017. Молекулярно-генетический анализ был проведен методами байесовской статистики и максимального правдоподобия с помощью MrBayes 3.2.7a и RAxML-NG v.1.1.0 [4]. В анализе также были использованы 35 последовательности COI, опубликованных в Генбанке (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>). Наилучшие модели эволюции нуклеотидов были определены в PartitionFinder2 [5]. Сеть гаплотипов была построена с использованием алгоритма медианного соединения в POPART [6].

Результаты молекулярного анализа подтверждают правильность определения вида как *S. rasifisa* на основе морфологических признаков. Предварительные данные указывают на отсутствие генетической изоляции популяции Корякского склона от популяций восточной Пацифики. Анализ распространения гаплотипов свидетельствует о том, что на Корякском склоне представлены гаплотипы, отмеченные для восточной Пацифики, в том числе, у побережья Орегона, в заливе Монтерей и в бассейне Гуаймас. Наиболее разнообразны в генетическом плане моллюски из залива Монтерей, в котором насчитывается два широко распространенных и более пяти уникальных гаплотипов. Это особенность может быть связана с большим разнообразием условий и большим диапазоном глубин, от 361 м до 959 м, местообитаний калиптоген из залива Монтерей, откуда известны молекулярные данные. Значительное сходство популяции Корякского склона с популяциями восточной Пацифики предполагает интенсивный обмен генетическим материалом. Обмен может осуществляться через еще не описанные популяции, обитающие на более северных участках склона Берингова моря.

Исследование было поддержано грантом Минобрнауки Российской Федерации, проект No 0149-2019-0009, соглашение No 075-15-2020-796.

Список литературы

- 1) Krylova E.M., Sahling H. Recent bivalve molluscs of the genus *Calypptogena* (Vesicomidae) // *Journal of Molluscan Studies*. – 2006. – Т. 72. – №. 4. – С. 359-395.
- 2) Данилин Д.Д. Двустворчатые моллюски как потенциальные индикаторы районов гидротермальной активности // *Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы»*. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. – 2013. – С. 291-294.
- 3) Peek A.S., Gustafson R.G, Lutz R.A., Vrijenhoek R.C. Evolutionary relationships of deep-sea hydrothermal vent and cold-water seep clams (Bivalvia: Vesicomidae): results from the mitochondrial cytochrome oxidase subunit I // *Marine Biology*. – 1997. – Т. 130. – №. 2. – С. 151-161.
- 4) Kozlov A.M. , Darriba D., Flouri T., Morel B., and Stamatakis A. 2019. RAxML-NG: A fast, scalable, and user-friendly tool for maximum likelihood phylogenetic inference. *Bioinformatics*, 35 (21), 4453-4455.
- 5) Lanfear R., Frandsen P.B., Wright A.M., Senfeld T., Calcott, B. PartitionFinder 2: new methods for selecting partitioned models of evolution for molecular and morphological phylogenetic analyses // *Molecular biology and evolution*. – 2017. – Т. 34. – №. 3. – С. 772-773.
- 6) Leigh J.W., Bryant D. POPART: full-feature software for haplotype network construction // *Methods in Ecology and Evolution*. – 2015. – Т. 6. – №. 9. – С. 1110-1116.

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДОВОГО ШОКА НА ЭРИТРОЦИТЫ *SCORPAENA PORCUS* (LINNAEUS, 1758) В УСЛОВИЯХ IN VITRO

Шалагина Н.Е., Богданович Ю.В.

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: эритроцит, холодовой шок, морфометрия, проточная цитометрия, *Scorpaena porcus* L., 1758.

Влиянию холодого шока на организм низших позвоночных (рыбы, амфибии) за последние 10-15 лет посвящено значительное число работ. Свидетельством тому является появление двух крупных обзоров [1,2]. Данный фактор ранее рассматривался исключительно как стрессорный. У многих организмов отмечали повышение концентрации в крови кортизола [3-4], который является молекулярным маркером данного состояния. Однако, как показали дальнейшие наблюдения, это не затрагивало или затрагивало в меньшей степени тех пойкилотермов которые обитали в водоемах (акваториях) с неустойчивым температурным режимом и подвергались периодическому действию гипотермии (мелководные водоемы, лагуны, прибрежный апвеллинг). Состояние холодого стресса для них не было характерно, несмотря на значительные температурные градиенты (10-15°C). При этом в организме развивался комплекс процессов, направленных на компенсацию действия данного фактора.

В условиях эксперимента *in vitro* исследовали влияние холодого шока на морфофункциональные показатели эритроцитов эврибионтного морского ерша *Scorpaena porcus* L., 1758, популяции которого часто подвергаются влиянию прибрежного апвеллинга.

Образцы цельной крови в количестве 0,5-0,7 мл получали пункцией хвостовой артерии. Полученные образцы делили на две равные доли, которые подвергали экспериментальной нагрузке. Одну содержали при исходных условиях 22°C (контроль), другую в холодильнике при 4°C (опыт). Экспозиция 3 часа. Для оценки морфометрических характеристик клеток красной крови изготавливали мазки крови, которые окрашивали по комбинированному методу Паппенгейма (Май-Грюнвальд + Романовский-Гимза).

Линейные размеры клеток крови определяли по фотографиям в компьютерной программе ImageJ 1.44р. При анализе зрелых эритроцитов для каждой клетки определялось 4 линейных размера (длина большой и малой оси клетки, C_1 и C_2 ; длина большой и малой оси ядра, N_1 и N_2). В дальнейшем рассчитывали: показатель формы клетки (MS), объем клетки (V_C), объема ядра (V_n), толщину клетки (h), площадь поверхности клетки (S_C) и ее ядра (S_n), величину ядерно-цитоплазматического отношения (NCR), удельную поверхность эритроцитов (SS_C) и их ядер (SS_n).

Для оценки однородности клеточной массы готовую суспензию эритроцитов окрашивали ДНК-красителем SYBR Green I. Способность эритроцитов к спонтанной продукции активных форм кислорода оценивали по флуоресценции красителя 2-7-дихлорфлуоресцеин-диацетата (D-CF-DA). Изменения мембранного потенциала митохондрий в эритроцитах контролировали, оценивая интенсивность флуоресценции клеток, окрашенных родамином 123 (R123). Долю поврежденных эритроцитов в суспензии анализировали, используя краситель пропидиум йодид (PI). Все измерения цитометрических показателей эритроцитов проводились на проточном цитометре Cytomics FC500 (Beckman Coulter, USA) при длине волны 488 нм.

Эритроциты морского ерша имеют эллипсоидную форму. Цитоплазма ацидофильная, что определяется высоким содержанием гемоглобина. Ядро компактное, расположено у большинства эритроидных форм в центре клетки и также имеет форму эллипса. Наличие гетерохроматина отражает низкую функциональную активность данной структуры. В условиях холодого шока клетки яв-

но приобретали более округлую форму. Визуально отмечали и рост размеров ядра. Это нашло отражение в изменении морфометрических параметров клеток красной крови.

Средняя длина большой оси эритроцитов (C_1) у образцов крови, находящихся при 22°C, составила $14,01 \pm 0,17$ мкм, малой оси (C_2) $8,97 \pm 0,13$ мкм. При охлаждении до 4°C значения C_1 уменьшались на 5,9 % ($p < 0,001$), а C_2 увеличивались на 11,1 % ($p < 0,001$). Показатель формы клетки (MS) уменьшался почти на 17 % ($p < 0,001$), то есть эритроциты приобретали более округлую форму, что хорошо согласовывалось с результатами визуального наблюдения. Это происходило на фоне некоторого роста объема клеток (V_c) и их поверхности (S_c). Однако различия не были статистически выражены ($p > 0,05$). Отсутствовали изменения и со стороны удельной поверхности клеток (SS_c).

Анализ метрических характеристик ядер у образцов, содержащихся при 22°C, дал следующие результаты: длина большой оси ядра (N_1) составила $5,10 \pm 0,06$ мкм, малой оси ядра (N_2) $3,26 \pm 0,05$ мкм. При охлаждении проб крови до 4°C в основном наблюдали изменение значений N_2 . Они увеличивались на 7,6 % ($p < 0,01$). Рост N_1 не был статистически выражен ($p > 0,05$). Это происходило на фоне значимого роста объема (V_n) и площади поверхности (S_n) ядер клеток соответственно на 16,8 % и 10,2 % ($p < 0,01$). Закономерные изменения претерпевала и удельная поверхность данной структуры (SS_n).

В целом можно констатировать опережающий рост объема ядер эритроцитов при 4°C по отношению к их клеточному объему. Величина ядерно-цитоплазматического отношения (NCR) увеличивалась на 15,2 % ($p < 0,01$). Сравнение состояния эритроцитов, находящихся в образцах крови при 22°C и 4°C показало однозначное снижение интенсивности флуоресценции SYBR Green I - 14 % ($p < 0,02$). Известно, что данный флуорохром проявляет максимальное свечение при взаимодействии с двухцепочной молекулой ДНК. При взаимодействии с одноцепочной ДНК и РНК интенсивность флуоресценции падает. Рост содержания РНК в ядре может отражать усиление процессов транскрипции в данной структуре.

Статистически значимых отличий в интенсивности флуоресценции R123 и DCF-DA между двумя образцами крови (при 22°C и 4°C) не отмечали ($p > 0,05$). То же можно сказать и в отношении PI. Это означает, что в клетках сохранялся мембранный потенциал митохондрий, поддерживалась целостность цитоплазматических мембран и отсутствовало усиление окислительных процессов.

Работа поддержана проектом РНФ N023-24-00061.

Список литературы

- 1) Donaldson M.R. et al. Cold shock and fish // Journal of Fish Biology. – 2008. – Т. 73. – №. 7. – С. 1491-1530.
- 2) Reid C.H. et al. An updated review of cold shock and cold stress in fish // Journal of Fish Biology. – 2022.
- 3) Koakoski G. et al. Divergent time course of cortisol response to stress in fish of different ages // Physiology & behavior. – 2012. – Т. 106. – №. 2. – С. 129-132.
- 4) He J. et al. Changes in the fatty acid composition and regulation of antioxidant enzymes and physiology of juvenile genetically improved farmed tilapia *Oreochromis niloticus* (L.), subjected to short-term low temperature stress // Journal of thermal biology. – 2015. – Т. 53. – С. 90-97.

МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕМОЦИТОВ *ANADARA KAGOSHIMENSIS* (ТОКУНАГА, 1906) В УСЛОВИЯХ ОСТРОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ГИПОКСИИ.

Богданович Ю.В., Рычкова В.Н., Шалагина Н.Е.

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: гипоксия, моллюски, гемолимфа, эритроциты.

Бентосные организмы, обитающие в придонных слоях воды, для которых характерен ограниченный водообмен, часто сталкиваются с дефицитом кислорода. Многие из них являются чрезвычайно устойчивыми к данному фактору. *Anadara kagoshimensis* (далее - анадара) является одним из видов, который может постоянно обитать в условиях гипоксических экотопов. В экспериментах, выполненных на данном виде, отмечена устойчивость моллюска к гипоксии и аноксии [1, 2], а также способность переносить присутствие H_2S [3, 4]. Большинство исследований выполнено на тканевом уровне. В настоящей работе исследуется реакция клеточных систем. Ядерные эритроциты в этом отношении являются удачной моделью. Это определило цель и задачи настоящего исследования.

Контрольная группа моллюсков содержалась при 7,0-8,2 мг O_2 / л, опытная – при 0,2-0,5 мг O_2 / л. Содержание кислорода понижали путем барботажа воды азотом в течение 2-х часов. Экспозиция – 48 часов. Температура воды в опытной и контрольной группе поддерживалась на уровне 17-20°C. Содержание кислорода в воде контролировали потенциометрически. В работе использовали оксиметр Ohaus ST-300D (США).

Гемолимфу отбирали стерильным шприцем из экстрапаллиальной полости моллюска, трижды отмывали в стерилизованной морской воде в течение 5 мин при 500 g и фильтровали через фильтр с диаметром ячейки 20 мкм. Процедуру выполняли при низкой температуре (4°C), препятствующей образованию агрегатов клеток. После отмывки часть концентрата клеток использовали для приготовления мазков. Оставшиеся клетки ресуспензировали в морской воде. Для идентификации типов клеток на проточном цитометре Beckman Coulter FC500 готовую суспензию окрашивали ДНК-красителем SYBR Green I (Sigma Aldrich, USA). Типы гемоцитов классифицировали на основании относительного размера (FSC) и уровня гранулярности цитоплазмы (SSC). Способность гемоцитов анадары к спонтанной продукции активных форм кислорода оценивали по флуоресценции DCF-DA (Sigma Aldrich, USA). Изменения мембранного потенциала митохондрий в эритроцитах контролировали при помощи красителя R123 (Molecular Probes, USA).

Мазки гемолимфы окрашивали комбинированным методом Паппенгейма и анализировали при помощи светового микроскопа PR-2 Lum (Biomed, Russia), оборудованного камерой C NG Series (Levenhuk, China). Большой и малый диаметры клеток (C_1 и C_2) и ядер (N_1 и N_2) измеряли по фотографиям в программе ImageJ 1.44 r для 100 клеток на каждом мазке. На основании полученных значений по известным алгоритмам рассчитывали средноклеточный объем (V_c), объем ядра (V_n) и толщину клетки (h) [5]. Одновременно на мазках гемолимфы определяли число аномальных клеток: макроцитов, микроцитов, шистоцитов, клеток с нарушением формы, отсутствием ядра и др. Статистические сравнения выполнены на основе непараметрического критерия Манна-Уитни, который не требует определения характера распределения значений. Результаты представлены как $M \pm m$. В работе использовали стандартный пакет Grapher, версия 11.

В условиях гипоксии интенсивность флуоресценции SYBR Green I снижалась более чем на 40% ($p < 0,01$); Rd 123 на 25% ($p < 0,05$). В отношении DCF-DA различия не были статистически выражены.

Эритроциты анадары имели форму слабовыраженного эллипса. Линейные размеры клеток и их ядер в условиях гипоксии не изменялись. Некоторая тенденция снижения отмечена для малой

оси клеток (C_2), но она не была статистически значима. Изменение V_c и V_n было разнонаправленно. Объем клетки понижался на 5,6%, а ядра увеличивался на 5,9%. При этом различия не были статистически выражены. Это сопровождалось незначительным ростом NCR. В гемолимфе в условиях гипоксии повышалось содержание микроцитов и шистоцитов.

Снижение флуоресценции Syber GREEN I может определяться следующими процессами. Известно, что данный флуорохром проявляет максимальное свечение при взаимодействии с двухцепочной молекулой ДНК. Он может также взаимодействовать с одноцепочной ДНК и РНК. В этом случае интенсивность флуоресценции падает. Рост содержания РНК в ядре может отражать усиление процессов транскрипции в данной структуре. Это хорошо коррелирует с тенденцией увеличения объема ядра, отмеченное выше. Уменьшение интенсивности свечения R123 в условиях острых форм гипоксии отражает снижение мембранного потенциала митохондрий клеток. При дефиците кислорода это состояние ожидаемо, так как O_2 выполняет функцию акцептора электроном в дыхательной цепи данного органоида.

Рост содержания в гемолимфе моллюска ряда эритроцитарных аномалий (микроцитов, шистоцитов) в определенной степени имеет смысл с функциональной точки зрения. Уменьшение размеров клеток позволяет увеличить респираторную поверхность эритроцитарной массы в целом. Случаи прямого (амитотического) деления эритроцитов в условиях экспериментальной гипоксии были отмечены ранее у камбалы-гlossы. Фрагментация цитоплазмы эритроидных форм гемолимфы анадары с образованием шистоцитов, вероятно, имеет тот же смысл и сопровождается, как следствие, образованием микроцитов.

Таким образом, эритроидные клетки гемолимфы анадары принимают активное участие в адаптации данного вида к условиям острой нехватки кислорода.

Работа поддержана проектом РНФ №23-24-00061.

Список литературы

- 1) Isani G. et al. Energy metabolism during anaerobiosis and recovery in the posterior adductor muscle of the bivalve *Scapharca inaequivalvis* (Bruguiera) // Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry. – 1989. – V. 93. – №. 1. – P. 193-200.
- 2) Soldatov A.A. et al. Peculiarities of organization of tissue metabolism in molluscs with different tolerance to external hypoxia // Journal of evolutionary biochemistry and physiology. – 2010. – V. 46. – №. 4. – P. 341.
- 3) Miyamoto Y., Iwanaga C. Effects of sulphide on anoxia-driven mortality and anaerobic metabolism in the ark shell *Anadara kagoshimensis* // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. – 2017. – V. 97. – №. 2. – P. 329-336.
- 4) Nakano T., Yamada K., Okamura K. Duration rather than frequency of hypoxia causes mass mortality in ark shells (*Anadara kagoshimensis*) // Marine Pollution Bulletin. – 2017. – V. 125. – №. 1-2. – P. 86-91.
- 5) Новицкая В.Н., Солдатов А.А. Особенности функциональной морфологии эритроидных элементов гемолимфы двустворчатого моллюска *Anadara inaequivalvis*, Чёрное море // Гидробиологический журнал. - 2013. – Т. 49. – №. 4. – С. 69-77.

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ФИТОПЛАНКТОНА НА МОРСКОМ КАРБОНОВОМ ПОЛИГОНЕ «РОСЯНКА»

Боровкова К.А.¹, Мошаров С.А.^{1,2}

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: фотосинтез, фотосинтетическая активность фитопланктона, Балтийское море, флуоресценция хлорофилла *a*.

Будучи центральным процессом в любой экосистеме, фотосинтез до сих пор является актуальной областью исследований, в частности процессы, происходящие в фотосинтетическом аппарате фитопланктона. Флуоресценция хлорофилла *a* является обобщенным интегральным параметром, позволяющим судить об эффективности и динамике начальных стадий трансформации энергии в фотосинтетическом аппарате микроводорослей [2]. Целью работы являлось изучение сезонной изменчивости активной флуоресценции хлорофилла *a* фитопланктона на морском карбонатовом полигоне «Росьянка». Морская площадка карбонатного полигона «Росьянка» находится в юго-восточной части Балтийского моря, в российской части Гданьской впадины.

Измерение активной флуоресценции проводилось по следующим параметрам - фоновая флуоресценция (F_0), максимальная флуоресценция (F_m) и переменная флуоресценция (F_v/F_m). Параллельно проводилось измерение экологических факторов: солёность, температура, мутность, освещённость в диапазоне ФАР. Отбор проб с разных горизонтов в пределах фотического слоя и ниже (0-34 м) производился с помощью батометров. Измерения параметров активной флуоресценции были выполнены с помощью высокочувствительного импульсного флуориметра Water-PAM (Walz). Профиль подводной освещённости ФАР и падающей на поверхность ФАР было выполнено с помощью комплекса Li-Cor (квантовый датчик LI-190, подводный квантовый датчик LI-192 и интегратор Li-1500). Исследования проводились в 2022 г. в следующие месяцы: апрель, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь.

Гидролого-гидрохимические условия в течение года изменялись незначительно. Можно предположить, что сезонная изменчивость флуоресцентных характеристик фитопланктона в первую очередь определялась уровнем освещённости. Глубина эвфотического слоя находилась в пределах 20-25 м. В результате проведенных измерений установлено, что наиболее высокие значения всех параметров фотосинтетической активности отмечаются в верхнем 15-метровом слое, что объясняется наиболее оптимальным уровнем освещения и температуры.

Значение F_0 характеризует базовый уровень флуоресценции хлорофилла при низкой интенсивности света, не вызывающей фотохимических реакций. Интенсивность фоновой флуоресценции F_0 хорошо коррелирует с суммарным содержанием хлорофилла *a*, что может характеризовать обилие фитопланктона. Максимальные значения отмечены в июне в наиболее прогретом и освещённом подповерхностном слое (317 отн.ед.). Наименьшие значения зафиксированы в конце ноября также в подповерхностном слое (68-87 отн.ед. в слое 0-5 м). В декабре наблюдалось некоторое увеличение F_0 в этом слое (100-114 отн.ед.). На глубине 10-15 показатели фоновой флуоресценции резко снижаются в апреле, августе, сентябре и июле. В ноябре и декабре показатели более равномерно распределены по всей глубине эвфотической зоны. Очевидно, что водный столб становится более перемешанным – это т.н. квазиоднородный слой, образованный процессом конвективного перемешивания под действием осеннего выхолаживания.

На основе значений F_0 и F_m была рассчитана величина относительной переменной флуоресценции (F_v/F_m), отражающая активность световых реакций фотосинтеза [4]. Максимальные значения F_v/F_m для фитопланктона при оптимальных условиях роста варьируют от 0,65 до 0,70 [3].

Отношение F_v/F_m характеризует потенциальную (максимально возможную для данного фитопланктона) фотохимическую эффективность фотосистемы II фитопланктона и показывает долю поглощенной световой энергии, направляемой непосредственно на фотосинтез при оптимальных условиях [3]. Результаты проведенных исследований показали высокую потенциальную активность первичных (световых) процессов фотосинтеза в эвфотическом слое на протяжении всего года. В верхнем наиболее освещенном слое 0-5 м потенциальная активность фитопланктона характеризуется высокими значениями в сентябре и начале ноября, наименьшие значения отмечаются в апреле. В апреле значения F_v/F_m распределены равномерно до 20 м, однако на глубине 25 м потенциальная фотосинтетическая активность увеличивается. Напротив, в июне на глубине 25 м потенциальная фотосинтетическая активность резко снижается по сравнению с верхним 20-метровым слоем. В осенние месяцы, как и в декабре, наблюдается равномерный профиль по всей глубине эвфотического слоя 0-25 м.

Таким образом, функциональная готовность фитопланктона в осенний период существенно возрастает по сравнению с летним и весенним периодом. Следует отметить, что в июле, на который приходится максимальные значения F_0 и F_m , потенциальная фотосинтетическая способность была минимальной. Для морской площадки карбонового полигона «Росьянка» сохраняются общие закономерности изменений фотосинтетической активности фитопланктона, имеющие ярко выраженный сезонный характер и присущие морям высоких широт. Наиболее тесно первичная продукция связана с освещенностью и уровнем прогрева вод. Однако с учетом фрагментарности данных о сезонной изменчивости фотосинтетической активности в Балтийском море очевидна необходимость проведения регулярных измерений параметров фотосинтетической активности, а также сопоставление данных с сезонными изменениями видового состава фитопланктона.

Работа выполнена в рамках НИР №FZWM-2021-0015 «Временная изменчивость потоков углерода на карбоновом полигоне в Балтийском море».

Список литературы

- 1) Мошаров С.А. Оценка функционального состояния морского фитопланктона по флуоресцентным показателям и соотношению концентраций феофитина и хлорофилла а / С.А. Мошаров, В.М. Сергеева // Вопросы современной альгологии. — 2018. — №. 1. — С. 10-10.
- 2) Рубин А.Б. Регуляция первичных процессов фотосинтеза / Рубин А. Б., Кренделева Т. Е // Успехи биологической химии. — 2003. — Т. 43. — №. 1. — С. 225-266.
- 3) Falkowski P.G. Aquatic photosynthesis / P.G. Falkowski // Princeton University Press. — 2013.
- 4) Suggett D.J. Comparing electron transport with gas exchange: parameterising exchange rates between alternative photosynthetic currencies for eukaryotic phytoplankton / D.J. Suggett, H.L. MacIntyre, T.M. Kana, R.J. Geider // Aquat. Microb. Ecol. — 2009. V. 56. P.147–162.

БАКТЕРИОПЛАНКТОН ЗАЛИВА БЛАГОПОЛУЧИЯ АРХИПЕЛАГА НОВАЯ ЗЕМЛЯ

Бычкова У.В.¹, Воробьева О.В.^{2,3}, Романова Н.Д.⁴

¹ФГБОУ ВО «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА им. К.И.Скрябина», г. Москва

²ФГБУН «ВНИРО», г. Москва

³МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

⁴Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: экология океана, Карское море, архипелаг Новая земля, залив Благополучия, бактериопланктон.

Как и во всех арктических районах пикопланктон Карского моря представляет особый интерес, так как обеспечивает процессы рециклинга и биологической деградации органического вещества в условиях ярко выраженной сезонности. Речные стоки Оби и Енисея формируют поверхностных опресненных слоев, оказывающий влияние на функционирование планктонных сообществ [2].

Залив Благополучия располагается на северо-востоке северного острова архипелага Новая Земля. Важной морфологической особенностью залива Благополучия (и некоторых других заливов Новой Земли, таких как залив Цивольки, Степового и др.) является наличие относительно глубокой котловины в центральной части залива и поднятия, а в некоторых случаях островов, на входе в залив [1]. Такие особенности могут привести к затруднению водообмена с морем, возникновению застойных явлений и даже гипоксии в придонных слоях заливов. Исходя из вышеперечисленных факторов анализ распределения и морфологического состава бактериопланктона может дать первое представление о роли прокариотической компоненты планктона в функционировании планктонного сообщества заливов данного типа.

Материал был собран с 24 по 26 сентября 2022 г. в ходе работ 89 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» на пяти станциях разреза от шельфа моря в куттовую часть залива Благополучия архипелага Новая Земля. Для анализа отбирали пробы поверхностной, придонной воды и слой максимума флуоресценции.

Общую численность прокариот определяли методом эпифлуоресцентной микроскопии, окрашивая пробы воды объемом 5 мл флуорохромом DAPI [4]. Линейные размеры клеток измеряли с помощью программы ImageScore M. Углеродную биомассу вычисляли исходя из объема клеток [5].

Общая численность прокариот в поверхностных водах составляла 156-256 тыс./мл, в придонных 40-94 тыс./мл. На большинстве станций максимальные значения численности наблюдались в слое пика флуоресценции, исключение составляла самая мелководная станция перед входом в залив. В поверхностном слое воды численность прокариотических клеток увеличивалась при переходе от шельфа к заливу, в самом заливе численность клеток остается стабильной. В придонном слое обилие прокариот было ниже значений в поверхностном слое от двух до шести раз и закономерностей в распределении вдоль разреза не наблюдалось. Средняя для столба воды численность прокариот варьировала от 151 до 195 тыс.кл./мл и достигала максимального значения во внешней части залива. Средний объем прокариотической клетки в поверхностном слое воды в зависимости от места взятия пробы изменялся в пределах 0,042-0,060 мкм³, в придонных – 0,035-0,049 мкм³.

В морфологическом составе прокариот преобладали коккоидные формы, составляя 64,7-79,7% в поверхностном слое воды и 56-78,5% в придонном. Доля палочковидных форм в поверхностном слое варьировала от 16 до 30%. В придонном слое доля палочковидных форм в общей численности прокариот увеличивалась по направлению в залив с 16.5 до 35.5%, лишь на крайней куттовой стан-

ции залива снова снижаясь до 20%. Доля других морфологических форм не превышала единиц процентов.

Углеродная биомасса в поверхностном слое воды составляла 6,08-9,56 мг/м³, в придонных – 0,85-2,98 мг/м³. Средняя для столба воды биомасса прокариот была минимальной на мелководной станции перед входом в залив, составляя 4,94 мгС/м³. В заливе этот показатель увеличивался по направлению к кутовой части с 6.18 до 7.21 мгС/м³ и был выше, чем в открытом море.

Таким образом, в заливе и открытой части моря наблюдается сходное вертикальное распределение количественных параметров бактериопланктона, и воды залива характеризуются большими показателями обилия прокариот и вкладом палочковидных форм. Однако для того, чтобы определить, вызваны ли эти различия гидрологическими особенностями залива, необходим дальнейший анализ функциональных параметров бактериопланктона.

Работа выполнена в рамках госзадания FMWE-2021-0007.

Список литературы

- 1) Степанова С.В. Особенности гидрофизического и гидрохимического режимов залива Благополучия (Новая Земля)/ С.В. Степанова, А.А. Недоспасов // Океанология – 2017 – Т. 57 – № 1 – с. 75–85.
- 2) Маккавеев П.Н. Поверхностный сток биогенных элементов с берега залива Благополучия (архипелаг Новая Земля)/ П.Н. Маккавеев, А.А. Полухин, П.В. Хлебопашев // Океанология – 2013 – Т. 53 – № 5 – с. 610–617.
- 3) Амелина А.Б. Зоопланктон заливов архипелага новая земля: состав, распределение, роль в выедании фитопланктона и биоседиментации/ А.Б. Амелина, А.В. Дриц, В.М. Сергеева, К.А. Соловьев, Н.А. Беляев, О.М. Дара, А.Б. Демидов, М.В. Флинт //Океанология – 2018 – Т. 58 – № 6 – С. 908–922.
- 4) Porter K.G., Feig Y.S. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora // Limnology and oceanography. 1980. V. 25. №. 5. P. 943-948. DOI:10.4319/lo.1980.25.5.0943
- 5) Романова Н.Д., Сажин А.Ф. Взаимосвязь между объемом бактериальных клеток и содержанием в них углерода // Океанология. 2010. Т. 50. № 4. С. 556–565.

К ТАКСОНОМИИ СЕМЕЙСТВА *CARPOCANIIDAE* (*RADIOLARIA*)

Василенко Л.Н., Хмель Д.С.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: радиолярии, карпоканиды, таксономия, ревизия.

Семейство *Carpocaniidae* является одной из разнообразных групп радиолярий. Скелеты карпоканид имеют близко овальную или удлинённо овальную форму и состоят в основном из двух отделов: цефалиса и торакса. Исключение составляет род *Carpocanopsis*, имеющий третий отдел – абдомен. Перистом разных видов карпоканид различен. Он представлен кольцевым гладким или ребристым устьем, гладким гребнем или обрамлён базальными выростами разного количества и размеров. Несмотря на частое присутствие карпоканид в отложениях кайнозоя, в исследовательских статьях им уделяется недостаточно внимания. Из-за небольших размеров скелетов и отсутствия доминирования их видов в осадках, представители этой группы часто остаются в литературе с открытым знаком номенклатуры. Это происходит из-за того, что до сих пор не определены чёткие критерии родов и видов карпоканид. Согласно последним данным, приведенным в работе O'Dogherty et al. [4] семейство *Carpocaniidae* включает роды *Anthocyrturium*, *Artobotrys*, *Carpocanium*, *Carpocanopsis* и *Tripterocalpis*. В более ранних работах [2; 3; 5 и др.] в состав этого семейства также были включены роды *Carpocanarium* и *Carpocanistrum*, исключение которых из состава семейства на данный момент является дискуссионным.

Цель работы выделить особенности родов *Carpocanium*, *Carpocanistrum*, *Carpocanarium* и *Carpocanopsis* для их последующей ревизии.

Материал для исследований представляет собой образцы драгирования, отобранные в ходе многочисленных морских экспедиций сотрудниками ТОИ ДВО РАН и керны глубоководного бурения, полученные по международным программам глубоководного бурения DSDP и IODP в северо-западной части Тихого океана.

Лабораторная обработка образцов и приготовление постоянных препаратов проводились по стандартной методике [1]. Таксономические определения были выполнены с помощью микроскопа МИКМЕД-6.

Согласно литературным данным, главные отличия исследуемых родов можно охарактеризовать следующим образом: род *Carpocanium* – цефалис внутренний отделён от торакса поперечной перегородкой; род *Carpocanistrum* – цефалис внутренний незначительно отделён от торакса без перегородки; род *Carpocanarium* – цефалис внешний с отчетливой перегородкой, торакс имеет небольшое количество достаточно крупных пор; род *Carpocanopsis* – цефалис внешний с отчетливой перегородкой, имеется абдоминальный отдел. Исходя из приведенных отличий, разделение родов *Carpocanium* и *Carpocanistrum* является весьма затруднительным, так как наличие или отсутствие внутренней перегородки не всегда хорошо просматривается в микроскопе. Другие роды *Carpocanarium* и *Carpocanopsis* имеют конкретные хорошо выраженные особенности, способствующие их идентификации.

Наличие большого фактического материала позволило сделать выборку скелетов карпоканид из разных временных интервалов кайнозойских отложений (олигоцен-ныне). В ходе работы были изучены 110 экземпляров, для которых определены морфологические и биометрические характеристики. К морфологическим характеристикам относятся: общая форма скелета, расположение цефалиса (внешний или внутренний), форма перистома, наличие абдоминальных выростов, форма и расположение пор. Биометрические характеристики включают: соотношение высоты к ширине скелета, диаметр перистома, размеры и количество пор, количество абдоминальных выростов (при их наличии). Следует отметить, что абдоминальные выросты не всегда хорошо сохраняются

у ископаемых радиолярий, это затрудняет идентификацию видов, но не влияет на установление родовой принадлежности карпоканид.

На основании морфологических и биометрических характеристик можно предположить, что родовая принадлежность некоторых видов, отнесённых O'Dogherty et al. [4] к роду *Carpocanium* может быть изменена (например, *Carpocanarium gargantua* (Renaudie & Lazarus), *Carpocanarium petrushevskayae* (Renaudie & Lazarus), *Carpocanarium crassus* (Carnevale), *Carpocanopsis cryptoprora* (Ehrenberg) и др.). Таким образом, может быть восстановлен статус рода *Carpocanarium* в семействе Carposaniidae. Дальнейшее изучение карпоканид позволит провести их детальную таксономическую ревизию и реконструировать эволюцию рассматриваемого семейства его в кайнозойскую эру.

Установление чётких критериев для определения родов и видов карпоканид является основой для ревизии не только уже описанных видов, но и будет способствовать выделению новых. Это представляет не только научный, но и практический интерес в познании биологического разнообразия животного мира как современного, так и древнего океана.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 22-17-00118) (микропалеонтологические исследования, интерпритация результатов) и по программе фундаментальных научных исследований ТОИ ДВО РАН (тема № 121021700342-9) (лабораторная обработка образцов, препарирование).

Список литературы

- 1) Точилина С.В. Биостратиграфия кайнозоя северо-западной части Тихого океана. М.: Наука, 1985. 133 с.
- 2) Haeckel E. Report on the Radiolaria collected by the H.M.S. «Glomar Challenger» during the years 1873-1876. Rep. sci. results of the voyage of H.M.S. Challenger during the years 1873-1876 // Zoology. Edinburg, 1887. Vol. 18. Pt. 1, 2. 1803 p.
- 3) Nigrini C.A., Moore Jr. T.C. A Guide to Modern Radiolaria, Cashman Foundation for Foraminiferal Research Special Publication, 1979. N1-106. 142 p.
- 4) O'Dogherty L., Suzuki N., Caulet J.-P., Dumitrica P. Inventory of Cenozoic radiolarian species (Class Polycystinea) – 1834-2020, in O'Dogherty L. (ed.), Catalog of Cenozoic radiolarians. Geodiversitas. 2022. T 44. № 5. P. 75-205.
- 5) Riedel W.R. Subclass Radiolaria. In Harland W.B. (ed.), The Fossil Record. A Symposium with Documentation. London: Geological Society of London. 1967. P. 291–298.

РЕПРОДУКТИВНАЯ БИОЛОГИЯ САМЦОВ КАРАКАТИЦ (*CERHALOPODA, SEPIIDA*) ИЗ ВОД ЮЖНОЙ АФРИКИ

Власова Е.В.¹, Сабиров Р.М.¹, Голиков А.В.²

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

²GEOMAR Helmholtz Center for Ocean Research, г. Киль

Ключевые слова: Mollusca, промысловые беспозвоночные, репродуктивная система, плодовитость, сперматофоры, сперматофорогенез.

Каракатицы – головоногие моллюски малого и среднего размера, принадлежащие к отряду Sepiida. Они широко распространены в умеренных и тропических водах Старого Света, западной части Тихого океана и Австралии; многие виды имеют важное промысловое значение [1]. Несмотря на широкое распространение каракатиц и их высокую промысловую ценность, данные об их репродуктивной биологии немногочисленны. При этом репродуктивная биология самок изучена подробнее, чем репродуктивная биология самцов. Фактически знания о репродуктивной биологии самцов сводятся к данным о количестве и длине сперматофоров, в то время как данные об особенностях морфологии, роста и функционирования репродуктивной системы, детальной морфологии сперматофоров и сперматофорогенезе немногочисленны и отсутствуют для подавляющего большинства видов. Однако они важны для понимания репродуктивной биологии не только отряда Sepiida, но и всего класса Cephalopoda в целом. В связи с этим, цель данного исследования – изучить репродуктивную биологию самцов пяти видов каракатиц из вод Южной Африки.

Исследовано 19 самцов *Sepia acuminata*, 24 самца *S. confusa*, 3 самца *S. bertheloti*, 4 самца *S. elegans* и 3 самца *S. orbignyana*, обитающих в водах Южной Африки [2]. Полный биологический анализ включал измерение массы и длины семенника и отделов сперматофорного комплекса органов (СКО); подсчет количества сперматофоров; измерение длины сперматофоров и их компонентов.

Репродуктивные системы самцов всех исследованных видов были устроены по сходному принципу и состояли из семенника и СКО, включающего семяпровод, 6 отделов сперматофорной железы и сперматофорный мешок, дистальной частью которого является пенис. Различия между пятью изученными видами в первую очередь заключались в количестве, морфологии и длине сперматофоров. Так, число сперматофоров *S. acuminata* составило 26–401 ($176,5 \pm 26,05$), число сперматофоров *S. confusa* равнялось 279–1136 ($748,2 \pm 70,35$), число сперматофоров *S. bertheloti* – 97–513 ($275,7 \pm 123,62$), число сперматофоров *S. elegans* – 168–847 ($488,3 \pm 139,55$) и число сперматофоров *S. orbignyana* – 143–851 ($388,3 \pm 231,47$). Для самцов *S. acuminata* и *S. confusa* были найдены достоверные положительные корреляции между числом сперматофоров и общим весом репродуктивной системы/весом семенника/весом СКО.

Сперматофоры всех исследованных видов были устроены по сходному принципу и состояли из головки, эйякуляторной трубки, цементного тела, семенного резервуара и задней полый части. Главное отличие в морфологии сперматофоров между видами заключалось в строении цементного тела. У исследованных видов были найдены три типа строения цементного тела: так цементное тело *S. acuminata* состояло из двух практически слившихся между собой частей, цементное тело *S. bertheloti*, *S. elegans* и *S. orbignyana* состояло из двух обособленных частей, а цементное тело *S. confusa* состояло из трёх частей. Эти данные могут быть полезны для систематики каракатиц, так как морфология цементного тела является важным систематическим признаком у головоногих моллюсков [3]. Длина сперматофора (ДС) *S. acuminata* составила 2,1–10,4 мм ($5,9 \pm 0,01$ мм), ДС *S. confusa* – 2,1–10,4 мм ($5,9 \pm 0,01$ мм), ДС *S. bertheloti* – 4,5–9,0 мм ($7,7 \pm 0,05$ мм), ДС *S. elegans* – 3,6–7,5 мм ($5,8 \pm 0,02$ мм) и ДС *S. orbignyana* – 5,9 – 11,3 мм ($7,1 \pm 0,03$ мм). Для

всех видов были найдены достоверные положительные корреляции между ДС и длиной семенного резервуара/объёмом семенного резервуара, таким образом наиболее длинные сперматофоры содержали наибольшее количество спермы. Также были найдены достоверные положительные корреляции между длиной сперматофора и длиной IV отдела сперматофорной железы и между длиной семенного резервуара и длиной I отдела сперматофорной железы.

Онтогенетические закономерности в изменении длины сперматофоров и их компонентов были найдены у *S. confusa*, *S. elegans* и *S. orbignyana*. Так сперматофоры зрелых самцов, производимые в более ранних периодах онтогенеза, имели меньшую длину, чем сперматофоры, производимые на более поздних этапах сперматофорогенеза. Кроме того, длина цементного тела, длина и объём семенного резервуара также увеличивались в течении онтогенеза. Таким образом, в течении онтогенеза улучшалось качество сперматофоров из-за улучшения их прикрепительной способности за счёт увеличения размеров цементного тела и увеличения объёма спермы за счёт увеличения длины и объёма семенного резервуара. Данная онтогенетическая закономерность для отряда Sepiida отмечается впервые.

Таким образом, нами была детально изучена репродуктивная биология самцов пяти видов каракатиц из вод Южной Африки. При этом исследования репродуктивной биологии *S. acuminata*, *S. confusa* и *S. bertheloti* были проведены впервые, а для *S. elegans* и *S. orbignyana* были получены данные о морфологии сперматофоров, размерах их составных частей и онтогенетических закономерностях сперматофорогенеза, ранее в литературе не встречавшиеся. Данные, полученные в настоящей работе, дополняют имеющиеся знания о репродуктивной биологии каракатиц и помогут объяснить общие закономерности репродуктивной биологии головоногих моллюсков в целом.

Финансирования в рамках данного исследования не было, материал был предоставлен кафедрой зоологии и общей биологии Казанского Федерального Университета.

Список литературы

- 1) Jereb, P. Cephalopods of the world. An annotated and illustrated catalogue. V.1. Chambered nautilus and sepioids/ Jereb P., Roper C. F. E. – Rome: FAO. – 2005. – 262 p.
- 2) Roeleveld M. A. C. The status and importance of cephalopod systematics in southern Africa / M. A. Roeleveld // African Journal of Marine Science. – 1998. – Т. 20. – С. 1-16.
- 3) Сабиров, Р. М. Репродуктивная система самцов головоногих моллюсков (Cephalopoda). III. Сперматофоры / Р. М. Сабиров // Ученые записки Казанского университета, серия «Естественные науки». – 2010 . – №2 (17). – С. 8-21.

ЗАЛИВ ВОСТОК: ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ ПО СОДЕРЖАНИЮ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОЛГОЖИВУЩИХ МИТИЛИДАХ

Дюрдеева А.А., Масалева К.Р.

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: *Crenomytilus grayanus*, *Modiolus modiolus*, залив Восток, Японское море, тяжёлые металлы.

Тяжёлые металлы – одна из важнейших групп загрязняющих веществ. Поскольку они присутствуют в окружающей среде в малых количествах, для их выявления используют аккумулярующие организмы – индикаторы и мониторы загрязнения среды. Двустворчатые моллюски – важное функциональное звено прибрежных морских экосистем, через которые проходят микроэлементные потоки с последующим их отложением в донные осадки [1]. Одновременно они относятся к промысловым объектам, и таким образом свидетельствуют о возможности их употребления в пищу. Непрерывно растущие концентрации тяжёлых металлов в прибрежных морских водах требуют их регулярного мониторинга.

Цель работы – оценить химико-экологическое состояние залива Восток по содержанию тяжёлых металлов в массовых видах двустворчатых моллюсков – митилидах. Задачами исследования являлось определение контаминантов в мидиях *Crenomytilus grayanus* и модиолах *Modiolus modiolus* и изучение пространственного распределения металлов в среде залива Восток, а также сравнение полученных данных с содержанием элементов в мидии Грея из Уссурийского залива.

Сборы моллюсков проводили в заливе Восток, расположенном в восточной части залива Петра Великого Японского моря. Крупные половозрелые особи (длина раковины 59–151 мм), отбирались водолазным способом на глубинах 3–4 м в октябре 2020 г. в прибрежных водах залива на 9 станциях: *C. grayanus* – на мысах Чайковского, Красном, Подосенова, у биостанции; *M. modiolus* – на мысах Пещурова, Пущина, Пашинникова, Елизарова, между мысами Елизарова и Подосенова, у биостанции. Отбиралось по пять экземпляров с каждой станции; в биотопе у биостанции присутствовали оба вида.

После очистки раковин от обрастателей и 48-часовой дефекации моллюсков препарировали, отделяя мягкие ткани целиком от створок и биссуса и замораживали для хранения. Мягкие ткани высушивали при температуре 85°C в течение 2–3 сут. до постоянной массы и механически гоменизировали. Каждая особь анализировалась отдельно после ее минерализации, которая производилась азотной кислотой в системе микроволнового разложения MARS 6 согласно ГОСТу 26929–94 [2]. Все полученные данные обработаны статистически и представлены в виде средней концентрации (\bar{x}) \pm стандартное отклонение (S), ($\bar{x} \pm S$).

Определение концентраций металлов производилось методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии (AAS) на приборе Shimadzu AA-6800 в пламенном варианте (Fe, Mn, Cu, Zn, Ni) и графитовой печи (Cd, Pb). Для оценки корректности определения количества металлов анализировались стандартные образцы с известным содержанием элементов.

Диапазоны концентраций элементов составляли: для *C. grayanus* Fe – 81,2–377,3; Mn – 0,9–146,8; Zn – 77,5–367,8; Cu – 4,0–18,0; Ni – 2,0–4,0; Cd – 2,8–8,1; Pb – 0,1–1,3 мкг/г; а для *M. modiolus* Fe – 116,8–355,6; Mn – 1,1–113,1; Zn – 93,3–325,0; Cu – 7,1–42,1; Ni – 3,4–5,2; Cd – 2,2–4,0; Pb – 0,1–1,1 мкг/г.

Ряды убывания концентрации тяжёлых металлов в тканях исследованных моллюсков, обитающих в заливе Восток, специфичны у каждого вида: для *C. grayanus* характерен ряд Fe > Zn > Mn > Cu > Cd > Ni > Pb, а для *M. modiolus* Fe > Zn > Mn > Cu > Ni > Cd > Pb. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что изучаемые долгоживущие митилиды в зали-

ве Восток накапливают Fe и Zn в наибольшей степени, чем другие металлы. Самым минорным элементом оказался Pb.

Сравнение концентраций металлов в моллюсках с разных станций показывает, что Fe накапливается в большем количестве в модиолусах, чем в мидиях. Сравнение моллюсков между собой можно было провести только по сборам у биостанции, где находились оба вида. Молиолус является более сильным аккумулятором таких металлов, как Fe, Mn, Zn, Cu. В то же время мидия Грея в большей степени, чем модиолус, аккумулирует Cd.

Приступая к анализу экологической обстановки по мидии Грея, можно выделить район между мысами Елизарова и Подосенова, с экстремально высокими концентрациями Fe, Mn, Zn – свидетелей терригенного и антропогенного влияния. Среди остальных станций сбора в заливе выделяется более высоким загрязнением Fe, Zn, Ni и Cd м. Пуцдина.

Оценивая ситуацию в заливе по содержанию элементов в модиолусе, можно выделить, как наиболее загрязненное место м. Красный (Fe, Mn, Zn), хотя более высокие количества Fe выявлены в моллюсках у биостанции и у м. Подосенова из-за терригенного стока. Влияние речного стока сказывается и в повышенных концентрациях других элементов, таких как Ni, Pb, Cd, свидетельствующих о техногенном воздействии.

По показаниям двух экологически различающихся видов моллюсков было выявлено два наиболее загрязненных места в заливе Восток: район между мысами Елизарова и Подосенова, экстремально высокие концентрации обусловлены началом строительных работ по созданию марикультурного хозяйства, и на м. Красном, где высокие концентрации обусловлены речным стоком р. Литовки.

Данные для мидии Грея, сравнивались с ранее полученными результатами исследования мидий из Уссурийского залива, 2018 [3]. В обоих заливах выбирались станции с наибольшими и наименьшими величинами концентраций металлов в моллюсках. Из Уссурийского залива взяты бухты Лазурная (наиболее чистая) и Суходол (подверженная речному стоку). Если средняя концентрация Cu в мидиях б. Суходол составляла 16,82, то в районе строительства марикультурного хозяйства в зал. Восток она достигала 18,5 мкг/г; для Zn в мидиях величины были следующими: б. Лазурная – 103,4, будущее хозяйство марикультуры (зал. Восток) – 332,4 мкг/г. Б. Лазурная была чище по показаниям Cu, Ni в мидиях, чем зал. Восток, в то же время зал. Восток был чище, чем Уссурийский залив по содержанию в мидиях таких элементов, как Fe, Mn, Zn, Cd.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-50-00034).

Список литературы

- 1) Кавун В.Я. Возрастная динамика микроэлементного состава тканей долгоживущих митилид *Crenomytilus grayanus* и *Modiolus kurilensis* // Биология моря. – 1994. – Т. 20. – №. 1. – С. 62–67.
- 2) Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов: ГОСТ 26929-94. – Введ. 1996-01-01. – М: Стандартинформ, 2010, 12 с.
- 3) Христофорова Н.К., Гнетецкий А.В. Содержание тяжелых металлов в долгоживущих митилидах уссурийского залива // Биология моря. – 2022. – Т. 48. – №1. – С. 30-37.

ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕФТЕОКИСЛЯЮЩИХ БАКТЕРИЙ ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЯПОНСКОГО МОРЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРИСУТСТВИЯ И ОТСУТСТВИЯ ГАЗОГИДРАТОВ

Еськова А.И., Пономарева А.Л.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: бактерии, деструкция углеводов, донные отложения, Японское море, газогидраты, физиолого-биохимические свойства.

Морские отложения являются уникальным местом обитания микроорганизмов. Микроорганизмы, населяющие донные отложения четко структурированы в зависимости от глубины, наличия кислорода, количества органического вещества, а также - присутствия или отсутствия газогидрата. Цель работы: исследование разнообразия, физиологических и биохимических свойств культур вируемых нефтеокисляющих микроорганизмов, выделенных из верхней части восстановленного слоя донных отложений северной части Японского моря газогидратного и негазогидратного рай-онов.

Из 23 проб восстановленного слоя донных отложений северной части Японского моря, отобранных в районе обнаружения газогидратов и в районе, где газогидраты обнаружены не были, было создано 65 накопительных культур. Из накопительных культур была выделена коллекция из 55 штаммов чистых культур, обладающих способностью к окислению углеводов. По результатам секвенирования гена 16S рРНК штаммы микроорганизмов, выделенных из донных отложений, принадлежали к филумам Pseudomonadota (Gammaproteobacteria), Bacillota, Actinomycetota.

Доминирующими были представители родов *Pseudomonas* (14 штаммов), *Psychrobacter* (13), *Stenotrophomonas* (11), *Bacillus* (5), *Rhodococcus* (4), менее встречающиеся: *Micrococcus* (1), *Nesterenkonia* (1), *Brevibacillus* (1), *Promicromonospora* (1), *Peribacillus* (1), *Robertmurraya* (1), *Curtobacterium* (1), *Nocardioides* (1).

В районе газогидратной залежи было выделено 37 штаммов, отнесенных к 9 родам, а в районе отсутствия газогидратов - почти в 2 раза меньше (18, отнесенных к 8 родам). В районе обнаружения газогидратов преобладают представители рода *Pseudomonas* (31%), а в негазогидратном районе – *Psychrobacter* (28%).

В результате исследований способности ферментировать различные субстраты было выявлено, что микроорганизмы, выделенные из района, где газогидраты не обнаружены, потребляют меньшее разнообразие субстратных источников, чем микроорганизмы, выделенные с района, где отмечено присутствие газогидратов. Наибольшая разница наблюдалась по потреблению лактата и сукцината штаммами. Лактат усваивался микроорганизмами, выделенными в газогидратной районе, в 2 раза интенсивнее, чем сукцинат.

Для оценки взаимосвязи между способностью к утилизации субстратных источников и содержанием метана в донных отложениях таксономическими группами была рассчитана корреляция Пирсона. Было установлено, что существует отрицательная корреляция (значения от 0,07 до 0,48; $P < 0,05$) между использованием штаммами сахаров в качестве источника углерода и энергии со значениями метана в донных отложениях. Твин-эстеразная активность была обнаружена у 5 штаммов из всех выделенных изолятов. Была отмечена положительная корреляция утилизации твина - 80 с максимальным содержанием метана (0,92). Использование штаммами аминокислот отрицательно коррелирует со значениями метана. Но отмечается положительная корреляция между способностью к деструкции карбоновых кислот и отсутствием газогидратов (значения от 0,94 до

1). Положительная корреляция потребления лактата с концентрацией метана отмечена в негазогидратном районе. Как показано ранее, наибольшее число штаммов, использующие в качестве субстрата лактат, выделены из района присутствия газогидратов.

Таким образом, выявлены новые геомикробиологические индикаторы приповерхностных газогидратных скоплений, которые являются наиболее перспективным объектом с точки зрения исследования их влияния на подводные экосистемы и использования как возможного энергетического ресурса будущего. Следовательно, микробное сообщество в данных районах исследования является уникальным и обладает рядом таксономических и физиологических особенностей, которые обусловлены присутствием или отсутствием малоглубинных газогидратов.

Работа выполнена в рамках гостемы «Исследование состояния и изменений природной среды на основе комплексного анализа и моделирования гидрометеорологических, биогеохимических, геологических процессов и ресурсов Дальнего Востока», (0211-2021-0012), научн. рук. Сырбу Н.С. Регистрационный номер: АААА-А19-119122090009-2.

**ПОЛИМОРФИЗМ МТДНК *MACROHECTORUS BRANICKII*
DUBOWSKY, 1974 (AMPHIRODA) – КЛЮЧЕВОГО ПЕЛАГИЧЕСКОГО
ЭНДЕМИЧНОГО ВИДА ОЗЕРА БАЙКАЛ**

Зайдыков И.Ю., Наумова Е.Ю., Суханова Л.В.

Лимнологический институт, Сибирское отделение Российской Академии Наук, г. Иркутск

Ключевые слова: Пелагические виды, Macrohectorus branickii, эндемик озера Байкал, амфиподы, COI.

Озеро Байкал - самое глубокое (1637 м) и старейшее озеро в мире, расположенное в центральной части Байкальской рифтовой зоны. Делится на три котловины за счет двух поднятий: Бугульдейско-Селенгинской перемычки и Академического хребта. Южная котловина имеет максимальную глубину 1420 м, Средняя - 1637 м и Северная - 900 м [1].

Среди большого количества видов (более 350 видов и подвидов) амфипод Байкала *M. branickii* - единственный ведет пелагический образ жизни [2]. *M. branickii* занимает в экосистеме озера положение сходное с таковым океанического криля или мизид крупных озер Европы и Сев. Америки. Этот вид единственный представитель макрозоопланктона в Байкале. Обитает в водной толще, является кормовым ресурсом всех пелагических рыб, байкальской нерпы, а так же потребляется донными и прибрежными рыбами. В зависимости от состава планктона и возраста *M. branickii* может питаться фитопланктоном (являясь первичным консументом) или хищничать, питаясь зоопланктоном и возможно личинками голомянки (являясь вторичным консументом) [2]. До сих пор многие стороны жизнедеятельности этого вида остаются либо неизвестными, либо носят неопределенный характер.

Для анализа использовались взрослые самки, отобранные сетью ДЖОМ тотально с глубин 400-0 м. в пяти точках озера Байкал в 2010 и 2013 году: у м. Толстый (Южная котловина), м. Орсо (Средняя котловина), м. Толстый на п-ове Святой Нос (Средняя котловина), м. Красный Яр (Северная котловина) и губы Болсодей (Северная котловина).

На основе последовательности первой субъединицы гена цитохром оксидазы (COI) митохондриальной ДНК (мтДНК) проведен анализ популяционной структуры пелагического вида амфипод из озера Байкал *Macrohectorus branickii*. С применением алгоритма объединения медиан («median joining») [3] построена сеть гаплотипов в программе Network 10.2, на которой обнаружено, что большинство полученных из разных районов последовательностей объединились в один общий гаплотип, от которого последовательно, на несколько мутационных шагов (1, 3, 13, 21, 49) отстоят несколько небольших групп гаплотипов. Пока не понятно, является ли такая структура отражением текущего состояния популяции *M. branickii*, к примеру, наличия независимых, но обитающих в одних районах популяций или следами произошедших в прошлом демографических событий в ныне единой популяции. Если рассуждать о событиях прошлого, то можно предположить изоляцию отдельных групп *Macrohectorus branickii* в разных районах Байкала, вызванную, например, климатическими изменениями и чередованием теплых и холодных эпох, следы периодического наступления которых, зафиксированы на Байкале [4]. Для более точной интерпретации полученных результатов, понадобится произвести дополнительные исследования и применить дополнительные молекулярные маркеры, которые позволят сделать более конкретные выводы как о текущем состоянии популяции *M. branickii*, так и о причинах подобного распределения.

Гос. тема «Исследования трансформаций состояния водоемов и водотоков Восточной Сибири в сезонных и долговременных аспектах в контексте изменений климата, геологической среды и антропогенных нагрузок» (0279-2021-0005, № гос. регистрации 0279-2021-0005).

Список литературы

- 1) Шимараев М.Н., Гранин Н.Г., Домышева В.М., Жданов А.А., Голобокова Л.П., Гнатовский Р.Ю., Цехановский В.В., Блинов В.В. О межкотловинном водообмене в Байкале // Водные ресурсы № 6 (30) . 2003. С. 678 –681.
- 2) Атлас и определитель пелагиобионтов Байкала (с краткими очерками по экологии) / О.А. Тимошкин, Г.Ф. Мазепова, Н.Г. Мельник и др. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 694с.
- 3) Bandelt H-J., Forster P., Rohl A. Median-joining networks for inferring intraspecific phylogenies // Molecular Biology and Evolution № 16. 1999. P. 37–48.
- 4) Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история / Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. и др. Новосибирск: Издательство СО РАН, филиал «Гео», 2001. 252с.

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ И ИХ ПОКОЯЩИХСЯ СТАДИЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСАДКАХ АМУРСКОГО ЗАЛИВА ЯПОНСКОГО МОРЯ

Зверева А.Ю.¹, Орлова Т.Ю.², Морозова Т.В.²

¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

²«Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского» ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: покоящиеся стадии, цисты, динофлагелляты, поверхностные осадки, Амурский залив.

Среди биотических компонентов морских экосистем микроводоросли - один из наиболее чувствительных элементов, реагирующих на изменения окружающей среды. Антропогенное загрязнение вод и изменение климата приводят к массовым вспышкам продуктивности фитопланктона («красным приливам»), в том числе и в Японском море.

Явления «красных приливов» напрямую связаны с массовым развитием динофлагеллят рода *Alexandrium* [1], продуцирующих токсины с паралитическими свойствами. Согласно литературным данным, покоящиеся стадии играют одну из важнейших ролей в инициации явления «красного прилива» и распространении видов. Поэтому исследование покоящихся стадий (цист) динофитовых водорослей позволяет не только изучать механизмы токсичного цветения, но и отслеживать изменения в обилии и видовом составе фитопланктона.

Целью работы является изучение видового состава покоящихся стадий (цист) динофитовых микроводорослей в современных поверхностных осадках Амурского залива Японского моря. В задачи исследования вошли описание покоящихся стадий, включая потенциально токсичные виды и виды, вызывающие цветение воды. Полученные данные важны для понимания долговременных изменений в структуре фитопланктона.

Исследования проводили в Амурском заливе на 17 станциях, расположенных вдоль западного побережья, включая бухту Перевозная, восточного побережья в черте г. Владивосток и открытой части акватории. Отбор осадков произведен по стандартным методикам [2,3] с борта маломерного судна «Витязь» 2-3 июля 2022 г. [4]. Латинские названия видов приводятся в соответствии с электронными базами данных AlgaeBase [5]. Микроскопические исследования проб проведены на приборной базе ЦКП «Морской биобанк» ННЦМБ ДВО РАН [4].

Предварительно в исследованном районе обнаружены 26 морфотипов цист динофлагеллят, из которых видовая принадлежность установлена для 22-х, и 4 определены до рода. Также были идентифицированы некоторые виды диатомей. Ниже приведен список видов:

Порядок *Gonyaulacales*: 1. *Alexandrium tamarense* (Lebour) Balech 1995; 2. *Gonyaulax digitalis* (Pouchet) Kofoid 1911; 3. *Gonyaulax elongata* (Reid) Ellegaard, Daugbjerg, Rochon, J. Lewis & I. Harding 2003; 4. *Gonyaulax spinifera* (Claparède et Lachmann) Diesing 1866; 5. *Pyrophacus steinii* (Schiller) Wall et Dale 1971; 6. *Protoceratium reticulatum* (Claparède et Lachmann) Bütschli 1885;

Порядок *Gymnodiniales*: 1. *Polykrikos kofoidii* Chatton 1914; 2. *Polykrikos schwartzii* Bütschli 1873;

Порядок *Peridinales*: 1. *Diplopsalis lenticula* (Bergh) 1881; 2. *Diplopelta cf. parva* (Abe) Matsuoka 1988; 3. *Protoperidinium claudicans* (Paulsen) Balech 1974; 4. *Protoperidinium conicoides* (Paulsen) Balech 1973; 5. *Protoperidinium conicum* (Gran) Balech 1974; 6. *Protoperidinium leonis* (Pavillard) Balech 1974; 7. *Protoperidinium minutum* (Kofoid) Loeblich 1970; 8. *Protoperidinium oblongum* (Aurivillius) Balech 1976;

Порядок *Thoracosphaerales*: 1. *Scrippsiella crystallina* (Lewis) 1991; 2. *Scrippsiella trochoidea* (Stein) Loeblich III (2 подтипа) 1976.

Среди обнаруженных видов присутствуют вредоносные: *A. catenella complex* - продуцирующий сакситоксины, и *Protoceratium reticulatum* - продуцирующий есотоксины. Обе группы ток-

синов являются опасными для здоровья человека. Попадая в ЖКТ через морепродукты (чаще всего моллюсков-фильтраторов и рыб), они вызывают желудочно-кишечные и неврологические заболевания [6]. Отравление первой группой получило название «паралитического отравления моллюсками». Вторая группа вызывает «диаретическое отравление моллюсками», особенностью которого является гепатотоксичность. Покоящиеся стадии этих видов были обнаружены вблизи бухты Перевозная и в западной черте г. Владивосток.

По количеству видов преобладающей группой являлся *Peridiniales* (8 видов). Чаще других встречались цисты *Protoperidinium conicoides*, *P. conicum*, *Scrippsiella crystallina*.

Распределение видов было неравномерным, на станции на центральном разрезе Амурского залива и близ бухты Перевозная было зафиксировано наибольшее количество видов (10 (также 1 до рода) и 9 (также 3 до рода) соответственно). Наименьшее количество видов обнаружено в районе неподалеку от п-ов Песчаный (2 и 1 морфотип, определенный до рода).

Таким образом, было обнаружено 26 морфотипов покоящихся стадий динофлагеллят, представленные, в основном, цистами. Среди них были обнаружены принадлежащие к вредоносным микроводорослям *A. catenella complex* и *Protoceratium reticulatum*, также способными инициировать цветение вод.

Необходимы дальнейшие исследования с учетом распределения численности вредоносных видов, и интерпретацией более ранних данных.

Работа была выполнена при поддержке гранта 1022022400001-0-1.6.16 (FWFE-2022-0001).

Список литературы

- 1) Коновалова Г.В. “Красные приливы” и “цветение” воды в дальневосточных морях России и прилегающих акваториях Тихого океана // Биология моря. – 1999. – Т. 25. – № 4. – С. 263-273.
- 2) Anderson D.M., Aubrey D.G., Tyler M.A., Coats D.W. Vertical and horizontal distributions of dinoflagellate cysts in sediments // Limnol. Oceanogr. – 1982. – Vol. 27. – P. 757–765.
- 3) Орлова Т.Ю., Морозова Т.В. Покоящиеся стадии микроводорослей в поверхностных осадках залива Петра Великого Японского моря // Биология моря. – 2009. – Т. 35. – № 4. – С. 256-265.
- 4) ЦКП «Морской биобанк» ННЦМБ ДВО РАН [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://marbank.dvo.ru/index.php/ru/?start=8> (дата обращения 30 декабря 2022)
- 5) AlgaeBase. [Электронный ресурс] / Guiry, M.D. & Guiry, G.M. // World [U+2012] wide electronic publication. – National University of Ireland, Galway. – 2022. – Режим доступа: <https://www.algaebase.org> (дата обращения 7 января 2023.)
- 6) Орлова Т.Ю., Селина М.С. Токсичные микроводоросли фитопланктона дальневосточных морей России: морфогенетика, состав токсинов и покоящиеся цисты динофитовой микроводоросли *A. tamarense* // Динамика морских экосистем и современные проблемы сохранения биологического потенциала морей России. В рамках программы "Исследование природы Мирового океана" Федеральной целевой программы "Мировой океан", II этап (2003-2007 гг.). – Владивосток, 2007. – С. 223-238.

ВЛИЯНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА СОСТАВ МЕЙОФАУНЫ ТРОПИЧЕСКИХ МОРСКИХ АКВАРИУМОВ И СОПРЯЖЕННЫХ ФИЛЬТРОВ

Зенина А.И.¹, Голиков А.В.², Неверов О.Д.¹, Власова Е.В.¹, Новиков А.А.¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

²GEOMAR Helmholtz Center for Ocean Research, г. Киль

Ключевые слова: Мейофауна, аквариумистика, *Polychaeta*, *Crustacea*, *Gastropoda*, *Foraminifera*, *Spongia*.

В настоящее время можно наблюдать повышение интереса к искусству аквариумистики и всем аспектам, прямо или косвенно соотносящимся с ним. Знание о точном составе мейофауны аквариума может дать достаточно данных для четкого планирования развития данного биоценоза и о возможных проблемах, которые могут ждать в процессе [1].

В рамках данной работы был проведен анализ постоянного видового состава морского аквариума и его зависимости от различных факторов. Исследования проводились в четырёх аквариумах. В одном из аквариумов гидрохимические показатели оставались неизменными, в трёх аквариумах в ходе работы были понижены показатели содержания нитратов для анализа изменения фаунистического состава.

Нами был поставлен эксперимент, в рамках которого мы понизили содержание нитратов в трех тестовых аквариумах, в четвертом же данный показатель оставался неизменным. За две недели данный показатель с 50 мг/л упал до 25 мг/л и стабильно оставался таким же до конца эксперимента. Параллельно в аквариумах наблюдались неконтролируемые и ненаправленные колебания других параметров, а именно: температуры – 25-26°C, солености – 36-37 ppt, нитритов – 0-0,1 мг/л, кальция – 380-400 ppm, не являвшихся целевыми для эксперимента, но имевших учитываемое влияние на мейофауну. Все изменения гидрохимических показателей отслеживались при помощи специализированных капельных тестов для аквариумов.

Пробы забирались с разницей в одну-две недели из произвольных частей каждого аквариума, промывались морской водой и фиксировались в 4 % растворе формалина с добавлением глюконата кальция. Нами были забраны четыре серии проб с каждого объекта; каждая серия включала в себя пробу грунта из аквариума и из сопряженного с ним фильтра, таким образом отслеживалась ситуация как в основном аквариумном биоценозе, так и в побочном, сформированном внутри фильтра. В каждой пробе производился количественный учёт всех найденных животных. Каждая группа животных помещалась в отдельный эппендорф с 70% этанолом. Животные, находящиеся в данных пробах, были выбраны из субстрата, подсчитаны и определены как минимум до семейства (для определения использовались следующие ресурсы [2]). В дальнейшем это дало нам представление об изменениях состава мейофауны через различные временные промежутки после изменения гидрохимического состава воды. В общей сложности мы забрали 32 образца грунта из аквариумов объема около пятидесяти миллилитров, продолжительность эксперимента составила около шести месяцев.

Во всех аквариумах самыми массовыми типами были: *Foraminifera*, *Annelida*, *Mollusca*, *Arthropoda*, они же и лидировали на протяжении всего эксперимента в большинстве проб по количеству особей и представленному разнообразию. Нами были найдены закономерности изменения численности животных разных таксономических групп, что позволило нам предположить, какие из найденных организмов могут быть биомаркерами изменений отдельных гидрохимических показателей.

В результате эксперимента во всех аквариумах помимо контрольного был зафиксирован взрыв численности рачков из семейства *Sphaeromatidae*, средняя численность в одном сборе 35-50 экземпляров на 50 мл пробы, и губок семейства *Tetillidae*, около 7-12 экземпляров на 50 мл пробы,

при условии отсутствия находок в сборах, сделанных до начала эксперимента. Остальные группы организмов не имели столь резких подъемов или спадов, но влияние на них изменений среды существовало.

Во всех аквариумах наблюдалось одинаковое направление колебаний численности животных из числа мейофауны, в рамках которой были отслежены нижеизложенные тенденции.

Были найдены положительные зависимости численности полихет из семейства Flabelligeridae и ракообразных из семейства Ameiridae от содержания нитратов. Полихеты из семейства Nephtyidae зависели от данного показателя отрицательно. Из брюхоногих моллюсков представители семейства Fissurellidae зависели от содержания нитратов положительно, а представители семейств Hydrobiidae и Calliostomatidae зависели от данного показателя отрицательно. Также отрицательная зависимость от содержания нитратов была характерна для губки из семейства Haliohondriidae. Следовательно, представители вышеперечисленных семейств могут служить биомаркерами нитратов. Также были найдены отрицательные зависимости численности рачков из семейств Tetragonicipitidae, Bairdiidae, Leptocytheridae и Paratanaoidea и губок из семейства Tetillidae от содержания нитритов. Клещи из семейства Halacaridae (растительноядные виды), полихеты из семейства Eunicidae, брюхоногие моллюски из семейства Buccinidae, ракообразные из семейств Maeridae и Ameiridae зависели от данного показателя положительно. Следовательно, представители вышеперечисленных семейств могут служить биомаркерами нитритов. Биомаркерами кальция можно считать рачков из семейств Sphaeromatidae и Ectinosomatidae, они положительно зависели от содержания кальция в окружающей среде. От температуры прямо пропорционально зависят ракообразные из семейств Maeridae и Ameiridae, полихеты из семейства Eunicidae и растительноядные виды клещей из семейства Halacaridae. Обратно пропорционально от этого фактора зависят рачки из семейств Tetragonicipitidae, Bairdiidae, Leptocytheridae и Paratanaoidea. От повышенной солености вод страдают ракообразные из семейств Ameiridae, Tisbidae, полихеты из семейств Phyllodocidae, Sabellidae. Положительно к этому показателю относятся гастроподы из семейства Colloniidae, Nassariidae, Babyloiniidae, Thiaridae, нерастительноядные клещи из семейства Halacaridae. Таким образом, нами было проведено исследование влияния гидрохимических показателей на состав мейофауны тропических морских аквариумов и сопряженных фильтров. Нами был выявлен перечень таксонов характерных для изучаемого объекта при условии сохранения неизменных условий. Также были установлены маркерные таксоны для нитратов, нитритов и кальция, помимо этого были найдены закономерности распределения организмов от температуры и солености. Наиболее показательными организмами, в целом, являлись ракообразные. Отдельные их группы реагировали на все изменяемые показатели.

Финансирования в рамках данного исследования не было, материал был предоставлен Неворовым О. Д.

Список литературы

- 1) Антонов С.В. Морской аквариум/ С.В. Антонов. - М.: АСТ; Астрель, 2001. – 80 с.
- 2) Schmidt-Rhaesa A. Guide to the Identification of Marine Meiofauna/ A. Schmidt-Rhaesa. - Munchen: Verlag Dr. Friedrich Pfeil, 2020. - 607 p.

ОСОБЕННОСТИ ТАКСОНОМИИ И МОРФОЛОГИИ ВИДОВ РОДА *PSEUDOCALANUS* В БАЛТИЙСКОМ И ЧЁРНОМ МОРЯХ

Казакова Д.М.^{1,2}, Полунина Ю.Ю.^{1,2}, Губанова А.Д.³

¹Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

³Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: зоопланктон, *Pseudocalanus acuspes*, *Pseudocalanus elongatus*, Балтийское море, Черное море, видовая идентификация.

Веслоногие рачки рода *Pseudocalanus* занимают важное место в морских экосистемах, являясь одним из основных пищевых объектов рыб-планктофагов и молоди рыб. Они обитают преимущественно в водах бореоатлантической неритической зоны северного полушария [1]. К роду *Pseudocalanus* относят семь видов, однако их видовая идентификация затруднена тем, что некоторые из них по своим морфологическим и морфометрическим признакам очень похожи. Размерные диапазоны многих видов перекрываются, к тому же они могут варьировать в широких пределах из-за изменений условий окружающей среды, поэтому достоверным признаком вида не являются.

Традиционно считалось, что в Балтийском море обитает только один вид *Pseudocalanus elongatus* (Brady, 1865), однако в 1989 г. была проведена ревизия рода [2], в ходе которой было установлено, что в Балтийском море присутствует один вид — *P. acuspes*. Работы по генетической идентификации особей рода *Pseudocalanus* в разных частях Балтийского моря подтвердили, что встречается преимущественно *P. acuspes*, а *P. elongatus* встречается единично в некоторых областях. Известно, что в Черном море обитает только один вид — *P. elongatus*.

Идентификацию этих двух видов по морфометрическим признакам было предложено проводить для самок — по форме цефалосомы, а для самцов — по соотношению определенных частей тела [2]. При этом были приведены морфометрические измерения некоторых частей тела самок — длина третьего сегмента уросомы (UIII) и его ширина (UIIIW), длина каудальных ветвей (CRL), и их соотношения (UIII:UIIIW, CRL:UIIIW), однако они не являются диагностическими признаками вида *P. elongatus*.

Проанализированы морфометрические измерения отобранных в Балтийском море (Юго-Восточная Балтика) самок *Pseudocalanus* sp. в весенний и осенний сезоны и отобранных в Черном море особей *P. elongatus* в летний сезон. Было проведено сравнение морфологии двух видов, а также сравнение морфометрических показателей с данными, приведенными в статье [2].

Длина тела балтийских особей варьировала весной от 1,20 до 1,63 мм, осенью от 1,00 до 1,49 мм; длина тела черноморских особей — от 1,03 до 1,50 мм. В статье [2] были приведены следующие диапазоны длин: 1,26 — 2,27 мм для *P. acuspes* и 1,11 — 1,77 мм для *P. elongatus*. Заметно, что они достаточно сильно перекрываются. И в осенний, и в весенний период есть особи, которых по длине можно отнести к *P. elongatus*, а также особи с длиной тела, выходящей за рамки предложенных диапазонов, что не позволяет использовать длину тела как определительный признак.

Анализ морфологических особенностей форм цефалосом особей показал, что в Черном море присутствует только *P. elongatus*. Большинство особей (70%), отобранных весной, можно отнести к *P. acuspes*, однако есть и те, у которых форма цефалосомы соответствует форме *P. elongatus*, и особи, чья форма цефалосомы не соответствует идеально ни одному из двух видов. Осенью оказалось, что самок с формой цефалосомы, соответствующей *P. elongatus*, больше: 50% можно отнести к *P. elongatus* и 50% — к *P. acuspes*.

В Балтике весной около 60% особей подходит под значения двух морфометрических критериев (UIII:UIIIW и CRL:UIIIW) для *P. acuspes*, причем первому критерию соответствует 59% особей, а второму — 82%. Осенью только 10% особей соответствует обоим морфометрическим критериям

для *P. acuspes*, из них 10% соответствует первому и 66% — второму. Значения критериев для *P. elongatus* не были приведены, поэтому данные, полученные для черноморских особей, также сравнивали со значениями, приведенными для *P. acuspes*. Здесь 9% особей подходило под первый критерий и 27% — под второй.

В Черном море часть особей можно по значениям морфометрических критериев отнести к виду *P. acuspes*, который точно здесь не встречается, это говорит о том, что полагаться на приведенные критерии для видовой идентификации в работе Фроста следует с осторожностью. Форма цефалосомы также в отдельных случаях не может дать однозначного ответа на поставленный вопрос.

Следует отметить, что Балтийское море обладает набором специфических условий, в первую очередь это пониженная соленость, а также широкий диапазон температуры воды. Это может влиять на морфометрические показатели особей, которые могут отличаться от показателей особей того же вида из других акваторий. Полученные нами данные не могут дать четкого ответа на поставленный вопрос о видовой идентификации *Pseudocalanus* sp. в Балтийском море и требуют более глубокого исследования, включая генетическое, которое планируется провести в ближайшее время.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИОРАН FMWE-2021-0012.

Список литературы

- 1) Corkett C.J., McLaren I.A. The biology of *Pseudocalanus* // *Advances in marine biology*. Academic Press. 1979. Т. 15. Р. 1 - 231.
- 2) Frost B.W. A taxonomy of the marine calanoid copepod genus *Pseudocalanus* // *Canadian Journal of Zoology*. 1989. Т. 67. №. 3. Р. 525 - 551.

ФИТОПЛАНКТОН ФИНСКОГО ЗАЛИВА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В ИЮЛЕ 2021-2022 ГОДАХ

Казакова Е.Ю., Дмитриева О.А.

Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО», г. Калининград

Ключевые слова: фитопланктон, Финский залив, биомасса.

Финский залив является одним из наиболее загрязненным районов Балтийского моря. Несмотря на наличие очистных сооружений в Санкт-Петербурге и снижению поступления биогенных элементов стоком р. Нева, степень эвтрофирования Финского залива на протяжении длительного периода времени не изменяется [1,2,3,4]. Изучение фитопланктонной сукцессии, как одного из показателей состояния водоема, позволит проанализировать начальные этапы структурных изменений и, в совокупности с другими элементами экосистемы, рассмотреть причины эвтрофирования Финского залива.

Для проведения данного исследования было отобрано 20 проб на 10 станциях в июле 2021 и 2022 годах в глубоководном, переходном и мелководном районах Финского залива. Отбор проб проводился с поверхности. Отобранные пробы, объемом 1 литр, фиксировались раствором «Кузьмина». Сгущение проб проводилось методом отстаивания. Обработка проб осуществлялась при помощи камеры «Учинская», объемом 0,01 мл. Численность и биомасса фитопланктона оценивалась стандартным методом. К доминирующим отнесены виды, биомасса которых ≥ 10 % от суммарной биомассы фитопланктона [5].

В период с 2021-22 гг. таксономическая структура фитопланктона Финского залива состояла из 86 таксонов из 8 отделов – Cyanophyta, Bacillariophyta, Dinophyta, Cryptophyta Haptophyta, Charophyta, Chrysophyta и Chlorophyta. Численность фитопланктона варьировала от 2681 млн. орг/м³ на станции в глубоководной зоне в 2022 г. до 14109 млн. орг/м³ на станции в мелководной зоне в 2021 г. Средняя численность в акватории отбора проб в 2021 г. составила 7276 млн. орг/м³, а в 2022 г. – 5776 млн. орг/м³. Значение биомассы в вегетативный период варьировало от 0,59 г/м³ в глубоководной зоне в 2022 г. и до 4,27 г/м³ на станции в переходной зоне в 2021 г. Среднее значение биомассы фитопланктона Финского залива в 2021г. составляло 2,4 г/м³, а в 2022 г. – 1,82 г/м³. В 2021 г. по биомассе доминировали Cyanophyta, Bacillariophyta и Dinophyta. В 2022 г. наибольшую долю в суммарной биомассе фитопланктона имели представители Cyanophyta, Charophyta и Cryptophyta. Среди всех представителей фитопланктонного сообщества в 2021 году выделялись 19 доминирующих таксонов, а в 2022 г. – 10 таксонов. В более опресненном районе с наименьшей глубиной в 2021 г. массово развивались *Mougeotia sp.* из отдела харофитовых водорослей и *Cryptomonas curvata* из отдела криптофитовых. В 2022 г. в мелководной опресненной зоне наибольшую долю в биомассе имел таксон из гаптофитовых водорослей - *Chrysochromulina sp.*. На станциях, располагающихся в глубоководной зоне, на протяжении исследуемого периода наибольшее развитие наблюдалось в динофитовых водорослях у представителей *Protoperdinium sp.* в 2021 г. и *Dinophysis acuminata* в 2022 г. В промежуточной зоне в 2021 году активно развивались *Mougeotia sp.*, *Monoraphidium minutum*, *Pyramimonas sp.*, *Tetraëdron caudatum* – зеленые водоросли и *Meristopedia warmingiana* – сине-зеленые водоросли. В 2022 году в промежуточной зоне наиболее массовым был вид *Cryptomonas curvata* из отдела криптофитовых.

При анализе двух лет исследований стоит отметить, что в 2021 г. численность, биомасса и количество доминирующих видов фитопланктона была выше, что возможно связано с наиболее высоким средним показателем температуры. Динамика и структура фитопланктонного сообщества между станциями изменяются в соответствии с гидрологическими особенностями выделенных районов исследования.

Список литературы

- 1) Golubkov S.M. Ecosystem of the Eastern Gulf of Finland: biodiversity and ecological problems // *Regional Ecology*. – 2014. – Т. 1. – №. 35. – С. 15-21.
- 2) Голубков С.М. и др. Функциональный сдвиг в экосистеме восточной части Финского залива под влиянием естественных и антропогенных факторов // *Доклады академии наук*. – Федеральное государственное бюджетное учреждение " Российская академия наук", 2010. – Т. 432. – №. 3. – С. 423-425.
- 3) Исаев А.В. Количественные оценки пространственно-временной изменчивости абиотических характеристик экосистемы восточной части Финского залива на основе данных наблюдений и математического моделирования // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. СПб: Изд. РГГМУ. – 2010. – Т. 21.
- 4) Кондратьев С.А. и др. К ОЦЕНКЕ БИОГЕННОГО СТОКА В ФИНСКИЙ ЗАЛИВ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. – 2018. – №. 51. – С. 109-120.
- 5) Мордухай-Болтовской Ф.Д. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов, 1975. С. 73-91

ВНУТРИКЛЕТОЧНЫЕ УРОВНИ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА И МЕМБРАННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ МИТОХОНДРИЙ ГЕМОЦИТОВ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ В УСЛОВИЯХ ГИПООСМОТИЧЕСКОГО СТРЕССА

Кладченко Е.С., Ткачук А.А., Андреева А.Ю.

Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: соленость, окислительный стресс, мембранный потенциал митохондрий, регуляторное снижение объема, осмолярность.

Колебания солености считаются одним из основных стрессовых факторов окружающей среды для гидробионтов. Хотя было показано, что колебания солености влияют на окислительно-восстановительный баланс и уровни митохондриального дыхания в различных типах клеток водных организмов [1], связь между осморегуляцией, метаболизмом активных форм кислорода и функционированием митохондрий гемоцитов двустворчатых моллюсков остается неясной. В настоящем исследовании мы оценили внутриклеточные уровни активных форм кислорода (АФК) и изменения мембранного потенциала митохондрий в гемоцитах средиземноморской мидии (*Mytilus galloprovincialis*) и тихоокеанской устрицы (*Magallana gigas*) после гипосмотического стресса.

Осмотический тест гемоцитов проводили путем серийных разведений суспензии гемоцитов в стерильной морской воде (1 мл) дистиллированной водой (по 1-2 мл) с постепенным снижением осмолярности и добавлением соответствующего объема гемоцитов для поддержания постоянной концентрации клеток. За физиологическую осмолярность принимали осмолярность гемолимфы моллюсков при солености 18 ‰ - 461 мОсм/л. Для количественного анализа кривой осмотической стойкости на программном обеспечении лазерного анализатора Ласка-ТМ проводили анализ параметров Н10, Н50 и Н90, соответствующих величине осмолярности среды, при которой происходил лизис 10 %, 50 % и 90% клеток в суспензии соответственно.

На начальных этапах теста разбавление суспензии гемоцитов сопровождалось их набуханием, а затем, при достижении критического объема клеток, начинался их постепенный лизис. У мидий лизис гемоцитов начинался при среднем уровне осмолярности среды 141.5 ± 10.3 мОсм/л. На этом уровне осмолярности среды лизировало 10 % гемоцитов мидий (параметр Н10 кривой осмотической стойкости). Полный лизис гемоцитов (параметр Н90) наблюдался при осмолярности среды 91.6 ± 6.7 мОсм/л. Лизис 50% клеток в суспензии наблюдался при 113.8 ± 8.3 мОсм/л. У устриц лизис гемоцитов при осмотическом стрессе (параметр Н10) начинался при осмолярности среды 131.3 ± 2.0 мОсм/л и заканчивался (параметр Н90) при осмолярности среды 83.8 ± 1.3 мОсм/л. Лизис 50 % гемоцитов отмечался при 104.9 ± 1.6 мОсм/л.

Для определения способности гемоцитов двустворчатых моллюсков регулировать свой объем после осмотического набухания или сжатия в условиях *in vitro* проводили моделирование гипосмотического и гиперосмотического стресса. Измерение кинетики регуляторных изменений объема гемоцитов в условиях осмотического стресса проводили при помощи метода лазерной дифракции. Для каждого вида моллюсков проводились идентичные экспериментальные процедуры. Инициация реакции регуляторного снижения объема (regulatory volume decrease, RVD) в ответ на гипосмотическое набухание осуществлялась следующим образом: осмолярность среды в 1 мл суспензии гемоцитов моллюсков (концентрация клеток $2-4 \cdot 10^6$ кл/мл, осмолярность 460.0 ± 2.0 мОсм/л) резко снижали до 216.0 ± 4.0 мОсм/л путем добавления дистиллированной воды (1 мл) и эквивалентного количества клеток (для сохранения постоянства их концентрации в измерительной кювете). Снижение осмолярности среды приводило к резкому (в течение 5-7 мин) набуханию гемоцитов мидий - средний объем клеток составлял 161.95 ± 4.25 % относительно уровня нормальной осмолярности

(460.0 ± 2.0 мОсм/л) ($p < 0.05$). Далее объем гемоцитов начинал постепенно снижаться и по истечении периода записи (60 мин) составлял 149.9 ± 1.9 %. У устриц гипоосмотический стресс также приводил к набуханию гемоцитов: в течение 3-5 минут объем клеток в суспензии увеличивался и составил 128.5 ± 4.6 % относительно исходного уровня ($p < 0.05$).

Чтобы проверить, сопровождается ли процесс адаптации к изменению солености окислительным стрессом, мы измерили внутриклеточные уровни АФК в гемоцитах после гипоосмотического стресса. Как для устриц, так и для мидий при гипоосмотическом шоке внутриклеточные уровни АФК быстро увеличивались и были значительно повышены в конце эксперимента по сравнению с контролем ($P < 0,05$). При гипосмотическом шоке мембранный потенциал митохондрий также значительно повышался по мере набухания клеток.

Таким образом, хотя осмолярность гемолимфы мидий и устриц была одинаковой и совпадала с осмолярностью морской воды (461.0 ± 2.3 мОсм/л), кривая осмотической стойкости гемоцитов устриц располагалась в области более низких осмолярностей, в сравнении с мидиями ($p < 0.05$, $n=10$). Гемоциты средиземноморской мидии и тихоокеанской устрицы демонстрировали классическую реакцию RVD в ответ на гипоосмотическое набухание. Гемоциты двух исследованных видов двустворчатых моллюсков оказались способны к реализации классического ответа RVD в ответ на гипоосмотическое набухание. При этом, более выраженные изменения объема клеток были характерны для мидий, которые набухали в 2 раза сильнее после гипоосмотической стимуляции, в сравнении с устрицами ($p < 0.05$). Сравнение полученных данных по динамике процесса RVD с гемоглобин-содержащими гемоцитами двустворчатых моллюсков, а также процессом восстановления объема эритроцитов в гипоосмотических условиях некоторых видов позвоночных свидетельствует о том, что степень набухания гемоцитов устриц и мидий была наименьшей, а динамика реакции RVD характеризовалась наименьшей скоростью. При этом процесс адаптации гемоцитов к гипоосмотическому стрессу сопровождался развитием окислительного стресса.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 121102500161-4 «Закономерности организации иммунной системы промысловых гидробионтов и исследование влияния факторов внешней среды на функционирование их защитных систем».

Список литературы

- 1) Jacoby R. P., Taylor N. L., Millar A. H. The role of mitochondrial respiration in salinity tolerance //Trends in plant science. – 2011. – Т. 16. – №. 11. – С. 614-623.

АКТИВНОЕ РАЗВИТИЕ НОЧЕСВЕТКИ (*NOCTILUCA SCINTILLANS*) У ПОБЕРЕЖЬЯ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ В 2022 ГОДУ

Ключанцева А.П., Лукашева Т.А.

Южное отделение института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Геленджик

Ключевые слова: зоопланктон, биомасса, ветровой режим, *Noctiluca scintillans*.

В основу статьи положен материал исследований, которые проводились в северо-восточной части Чёрного моря, в Голубой бухте рядом с городом Геленджик на базе лаборатории экологии института Океанологии РАН им. Ширшова в 2022 году. Отбор проб проводился около 9–10 утра с пирса, на расстоянии 170 метров от берега с помощью сети Конус Малый, площадь входного отверстия $0,2 \text{ м}^2$ из капронового сита, длина сетевого мешка — 1 м, размер ячеек 180 мкм. Лов — вертикальный, облавливаемый слой 0–6 м над глубиной 7 м, объём профильтрованной воды $1,2 \text{ м}^3$. Одновременно с взятием пробы измеряли температуру поверхности морской воды, температуру на глубине 6 метров и температуру воздуха.

Обработку проб проводили в камере Богорова под бинокуляром с 32-х кратным увеличением. Для определения видового состава пробы использовали определители фауны Чёрного и Азовского морей. Также производили подсчёт численности особей. Всего было обработано 24 пробы за 8 месяцев, с января по август, по 3 пробы на месяц.

Годовая динамика численности и биомассы зоопланктона в 2022 году показала, что его структура не претерпела существенных изменений видового состава и он был представлен обычными для данного региона видами. В течение всего года в пробах планктона встречаются круглогодичные виды *Oithona davisae*, *Acartia clausi*, *Noctiluca scintillans*, их численность и биомасса колеблется в зависимости от сезона. Особенностью динамики зоопланктона в 2022 году было то, что в отличие от предыдущих лет, для этого года характерно позднее начало интенсивного развития планктонных сообществ [1, 2]. Также отличительной особенностью 2022 года является интенсивный рост *N. scintillans*.

Гетеротрофная водоросль *Noctiluca scintillans* в 2022 году встречалась в большом количестве с марта по июнь, составляя от 70 % до 96 % общей численности зоопланктона в этот период. В 2021 году её вклад в структуру был не столь значительным, он составлял всего 4 % от суммарной численности зоопланктона. Среднемесячные значения температур весной и в первый месяц лета 2022-го были ниже, чем в 2021-м.

Условия 2021 года не способствовали развитию *N. scintillans*, в отличие от 2022, основной причиной являлся ветровой режим. Период интенсивного развития ночесветки совпал со штилем или относительно спокойной погодой, при низкой повторяемости сильных западных и юго-восточных (со скоростью ветра выше 12 м/сек), эта погода способствует развитию мелкого фитопланктона, которым питается *N. scintillans* [3]. Совпадение ветрового и кормового режимов привели к вспышке численности и это наиболее вероятная причина интенсивного развития этого вида. Общая численность *N. scintillans* за эти месяцы в 2022 (61647 экз/м^3) превысила численность в 2021 (348 экз/м^3) в 177 раз. Именно высокая численность *Noctiluca scintillans* является отличительной особенностью этого года.

Пик численности и биомассы этого вида в 2021 году приходился на май-июнь. В 2022 году при апрельском-майском снижении температуры воды была замечена ранняя вспышка численности и биомассы.

С июня численность этого вида в приповерхностном слое начинает снижаться, что связано с повышением температуры вследствие прогревания. Осенью, зимой и весной распределение *Noctiluca scintillans* более равномерное. Общая биомасса за рассматриваемые месяцы в 2022 (4378 мг/м^3)

превысила биомассу *N. scintillans* в 2021 (21.952 мг/м³) в 199 раз, что является выбивающимся из многолетнего мониторинга случаем и требует дальнейшего рассмотрения [4].

Данная работа была выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-17-00066.

Список литературы

- 1) Петипа Т.С., Сажина Л.И., Делало Е.П. Вертикальное распределение зоопланктона в Черном море // Труды Севастопольской биол. станции 1963. Т. 16. 137 с.
- 2) Шушкина Э.А., Виноградов М.Е., Лебедева Л.П. Распределение зоопланктона в прибрежье северо-восточной части Чёрного моря в тёплый климатический период // Океанология Т. 44, № 4. 2004. 537 с.
- 3) Аркашевич Е.Г., Тимонин А.Г., Кременецкий В.В. Влияние гидрофизического режима на распределение зоопланктона Чёрного моря // Океанология на старте 21 века. 2008. С. 43-56
- 4) Мониторинг пелагических сообществ северо-восточной части Чёрного моря: макро- и мезопланктон / Виноградов М. Е. [и др.] // Океанология. Т. 45, № 3. 2005. С. 381-392.

ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ БОГАТСТВО СООБЩЕСТВ МАКРОЗООБЕНТОСА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ Г. ПЕТРОЗАВОДСК

Коновалов Д.С., Назукова Ю.О.

Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск

Ключевые слова: биомониторинг, биотические индексы, кривые накопления, статистический анализ биологических данных.

Одним из методов биоиндикации водных объектов по организмам макрозообентоса является биотический индекс Вудивисса, позволяющий без высокой квалификации исполнителя определить сапробность водного объекта. Эта система оценки качества воды объединяет как общее разнообразие, так и наличие индикаторных «групп» донных организмов. [1] При повышении уровня загрязнения водного объекта представители этих групп исчезают из сообщества. По сумме «групп» и качественному составу сообществ макрозообентоса рассчитывается значение биотического индекса Вудивисса.

Однако мониторинговые исследования предполагают отбор большого количества проб для достоверного описания состояния исследуемых объектов. Мы предполагаем, что для выявления значимых отличий в сообществах макрозообентоса можно, во-первых не проводить идентификацию организмов до уровня вида; во-вторых не отбирать большое количество проб.

Для проверки состоятельности данной гипотезы и адекватности применения данного метода нами было выполнено следующее: отобраны пробы макрозообентоса в водных объектах г. Петрозаводск (р. Лососинке, р. Неглинке и на литорали оз. Онежского) в соответствии с методикой [2]; определили организмы макрозообентоса до надвидовых рангов с использованием атласов-определителей [3,4]; составлена база данных о встречаемости «групп» организмов в пунктах наблюдений; рассчитан биотический индекс Вудивисса в соответствии с модифицированной для водных объектов Карелии методикой [1]; составлены рандомизированные ряды накопления таксономического богатства и рассчитаны уравнения регрессии модельного изменения таксономического богатства (S) с увеличением выборочного усилия (n).

Модельное таксономическое богатство описано уравнением степенной регрессии $S=an^b$, где a — ожидаемое значение таксономического богатства в первой случайно отобранной пробе, а b — скорость накопления таксономического богатства, обусловленная увеличением числа исследованных проб (n).

В период с 11.07 по 14.09 в каждом пункте наблюдений было отобрано 6 проб (12 на каждом водном объекте). Исследуемые водные объекты отличались по уровню таксономического богатства сообществ макрозообентоса, по результатам эмпирических данных. По модельным данным пункты наблюдений также отличались.

Установлено, что наибольшее таксономическое богатство в первой случайно отобранной пробе (коэффициент a) было установлено в пункте наблюдений в р. Лососинке (пункт с минимальным антропогенным воздействием), а минимальное значение — на р. Неглинке (в схожих по уровню антропогенного воздействия условиям). Наибольший коэффициент b был установлен для оз. Онежского (пункт наблюдений в черте города).

Были установлены следующие тренды изменчивости таксономического богатства в исследуемых сообществах макрозообентоса:

- В пунктах наблюдений в зоне «условного» отсутствия антропогенного воздействия модельное таксономическое богатство выше, по сравнению с пунктами с повышенным антропогенным воздействием. Это указывает на разный уровень загрязнения воды в пунктах наблюдений. Наиболее загрязненными оказались пункты наблюдений в черте города, на р. Неглинке

и оз. Онежском. Эта закономерность, мы предполагаем, связана с большим поступлением органического вещества и сточных вод с водосбора реки Неглинка и с городской части водосбора оз. Онежского в соответствующие водные объекты;

- Пункты наблюдений различались между собой по значению выборочного усилия (n), необходимого для описания полного таксономического богатства сообществ макрозообентоса. Так, минимальное значение ($n=12$) было выявлено для оз. Онежского, пункт наблюдения в зоне условного отсутствия антропогенного воздействия. Максимальное значение ($n=110$) было выявлено для р. Неглинка, пункт наблюдения в зоне условного отсутствия антропогенного воздействия. Это, по-видимому, связано с размерами и типом водного объекта, однако проверить это можно только с расчетом расхода воды;
- По мере уменьшения размера водного объекта уменьшается таксономическое богатство в нем. Этот тренд требует большего числа аргументов для доказательства или опровержения, для его проверки нужно увеличить число пунктов наблюдений и рассчитать расход воды в реках. По нашим данным, в р. Лососинке (пункт наблюдений в зоне условного отсутствия антропогенного воздействия) таксономическое богатство первой случайно отобранной пробы выше ($a=3.26$), чем в р. Неглинке (в схожих условиях) – $a = 0.88$;
- По распределению статистики D-теста (критерий Колмогорова-Смирнова) коэффициенты a и b всех моделей значимо отличались. Это говорит о высоком уровне отличия исследуемых величин во всех водных объектах. Они разнородны по данным коэффициентам.

Эти тренды позволили заключить, что методика биоиндикации с использованием биотического индекса Вудивисса позволяет делать значимые выводы о таксономическом богатстве и сапробности, имея ряд преимуществ: 1) снижение числа проб, необходимых для анализа; 2) нет необходимости в идентификации организмов до видового ранга.

Перспективным направлением в использовании данной методики является проверка чувствительности биологического анализа воды по организмам макрозообентоса в пунктах наблюдений, которые изначально мало отличаются по уровню загрязнения. В нашем случае на каждом водном объекте изначально были выбраны заведомо различающиеся по уровню загрязнения водные объекты, поэтому отличия в ожидаемом таксономическом богатстве и скорости его накопления получились большими.

Список литературы

- 1) Полякова Т.Н. Рекомендации по оценке состояния экосистем малых водоемов по организмам макрозообентоса / Т. Н. Полякова // Изучение водных объектов и природно-территориальных комплексов Карелии. - Петрозаводск, 2007. - С. 85-106. - ISBN 978-5-9274-0240-02. - Библиогр.: с. 105 (13 назв.)
- 2) Заика Е.А., Молчанова Я.П. Рекомендации по организации полевых исследований состояния малых водных объектов с участием детей и подростков. М., 2001.
- 3) Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР. Л., 1977. 511 с
- 4) Чертопруд М.В, Чертопруд Е.С. Краткий определитель беспозвоночных пресных вод центра Европейской России. 2003.

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИТО- И ЗООПЛАНКТОНА В СИСТЕМЕ Р. ПРЕГОЛЯ – КМК – КАЛИНИНГРАДСКИЙ (ВИСЛИНСКИЙ) ЗАЛИВ – БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ В 2022 Г.

Коробченкова К.Д.^{1,2}, Семёнова А.С.^{3,4}, Дмитриева О.А.^{2,3}, Ульянова М.О.²

¹Балтийский Федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

³Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО», г. Калининград

⁴Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанова РАН, пос. Борок

Ключевые слова: юго-восточная часть Балтийского моря, плюм, фитопланктон, зоопланктон.

Устьевая область реки Преголя, Калининградский залив и Калининградский морской канал (КМК), соединенный Балтийским проливом с морем, формируют единую гидродинамическую систему, для которой характерны смешение пресных и морских вод, а также вертикальный и горизонтальный градиент солености.

Целью работы было выявить особенности пространственного распределения в данной системе фито- и зоопланктона с учетом гидрометеорологических условий в марте, мае и октябре 2022 г.

В 2022 г. выполнено три экспедиционных выхода (2 марта, 25 мая и 13 октября), включавших гидрофизическое зондирование (зондами CastAway и CTD-90M) и отбор проб фито- и зоопланктона с поверхностного и придонного горизонтов на мелководных станциях и дополнительно на горизонтах 10 и 20 м на глубоководных морских станциях. Пробы обрабатывали по стандартным методикам.

Была выявлена зависимость распределения планктонных сообществ от гидрологических условий. За два дня до экспедиции в марте 2022 г. преобладал ветер восточного направления, способствующий выносу речных и заливных вод. На профилях температуры и солености в этот период был отчетливо виден поверхностный вынос речной воды по КМК, который распространяется практически до Приморской бухты, а плюм заливных вод прослеживался на несколько миль от берега. Затем направление ветра сменилось на западное, способствующее затоку морских вод по дну канала и залива, что отразилось на профилях температуры и солености. В этот период в фитопланктоне, по биомассе доминировали представители речного фитопланктона (из рода золотистых *Synura* sp. и диатомовых *Diatoma* sp.), биомасса фитопланктона в опресненной части была выше, чем в прибрежной зоне Балтийского моря. В устьевом, наиболее опресненном районе р. Преголя зоопланктон был представлен исключительно пресноводными видами, при возрастании солености и приближении к морскому проливу возрастала доля солоноватоводных видов, в частности *Eurytemora affinis*, в проливе наряду с солоноватоводными отмечены и морские виды, такие как *Temora longicornis*; в прибрежной зоне Балтийского моря доминировали морские виды. Численность и биомасса зоопланктона, как и фитопланктона была выше в опресненных водах КМК по сравнению с прибрежной зоной Балтийского моря.

В мае и октябре 2022 г. ветер западного направления сменялся на южное, осенью порывы ветра достигали 10–11 м/с. Смена направления ветра создавала условия для поверхностного выноса речных вод и затока морских вод по дну. В мае на профиле температуры и солености наблюдается стратификация водной толщи, в поверхностном слое приустьевой зоны КМК отмечены линзы воды с максимальными значениями температуры и минимальными солености. В этот период были отмечены максимальные для года количественные показатели зоопланктона, при этом показатели в заливе превышали показатели в КМК в 3–4 раза. В прибрежной зоне Балтийского моря численность зоопланктона была ниже, чем в КМК, а биомасса сопоставима с биомассой в КМК.

При приближении к морскому проливу как в КМК, так и в Вислинском заливе возрастала доля морских видов, в прибрежной зоне моря она была максимальна.

Осенью водная толща на протяжении практически всего КМК однородна по температуре и солености, на выходе из Балтийского пролива можно выделить ярко выраженную фронтальную зону и водная толща в прибрежной части Балтийского моря квазиоднородна до верхней границы сезонного термоклина (до 38–40 м). В этот период количественное развитие зоопланктона снижалось по сравнению с маем во всех подрайонах в 2–8 раз, особенно сильно падала биомасса в прибрежной зоне моря, при этом количественное развитие зоопланктона в КМК было выше, чем в Вислинском заливе. Как и в весенний период, доля морских видов возрастала при приближении к морскому проливу, но в целом зоопланктонное сообщество имело более сглаженную структуру по сравнению с весенним периодом.

Таким образом, можно выделить следующие ситуации, характерные для исследуемой акватории: переменные ветра создавали условия для одновременного затока морских вод по дну канала и залива и поверхностного выноса речных вод весной и осенью 2022 г., в марте наблюдался ещё и плюм из залива. Данные условия влияли на видовой состав фито- и зоопланктона. Весной при выносе речных вод в устьевой зоне доминировали представители речного фитопланктона, в начале и конце весны и осенью при затоке в проливе, наряду с солоноватоводными видами, отмечены и морские виды зоопланктона.

Исследование гидрологических параметров было поддержано из средств программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» БФУ им. И. Канта, научный проект № 122110200031-7. Гидробиологические исследования выполнены в рамках госзадания ИО РАН (тема №FMWE-2021-0012).

ВОЗРАСТ И РОСТ КЛЮВОРЫЛОЙ АНТИМОРЫ *ANTIMORA ROSTRATA* (*MORIDAE, GADIFORMES*) В РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТЯХ АРЕАЛА

Коростелев Н.Б.^{1,2}, Беляков В.В.^{1,3}, Буш А.Г.¹, Орлов А.М.^{1,2}

¹Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, г. Москва

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: клюворылая антимора, *Antimora rostrata*, возраст, рост, отолиты.

Согласно современным данным [1], клюворылая антимора *Antimora rostrata* (Gunther, 1878) - один из двух представителей рода *Antimora* семейства Moridae. Она встречается практически во всех районах Мирового океана, за исключением Северной Пацифики. Антимора - глубоководная рыба, ведущая придонно-пелагический образ жизни, часто встречается в прилове при промысле донными тралами и ярусами [2,3]. Некоторые исследователи указывают на перспективность использования антимор, как объекта промысла [4]. В разных частях ареала популяции клюворылой антиморы имеют различные темпы роста [3,5]. В данной работе представлены новые сведения о росте и возрасте клюворылой антиморы в водах Фолклендских островов и обобщены известные данные о росте и возрасте вида в разных частях ареала.

В исследованной выборке, состоящей из 261 особи, из вод Фолклендских островов общая длина тела (*TL*) рыб варьировала от 13 до 75 см, в среднем 54.3 см, масса тела - от 10 до 3438 г, в среднем 1364 г. Подсчет колец на сломах отолитов показал минимальный возраст антиморы в исследуемой выборке 8 лет, а максимальный - 46 лет, при этом медианные значениями возраста в уловах составили 32 года. Рассчитанные по фактическим данным коэффициенты уравнения роста Бергаланфи составили:

$$L_{\infty}(TL) = 1428, K = 0.001, t_0 = -1.60$$

В предшествующих исследованиях проводили сравнение роста клюворылой антиморы для выборок из разных частей ареала: морей Росса, Лазарева и Уэдделла, вод островов Крозе, Кергелен Маккуори и Фолклендских, вод Новой Зеландии, Срединно-Атлантического хребта, Гренландии, Исландии и банки Флемиш-кап [3,5]. Сопоставление собственных данных с опубликованными указывает на различия в характеристиках роста клюворылой антиморы в разных частях ареала. Так кривые роста антимор из вод Фолклендских островов, Новой Зеландии и банки Флемиш-кап оказались сходными, демонстрируя более медленные темпы роста особей в сравнении с рыбами из других районов.

Различия в темпах роста антимор могут быть связаны с разными условиями среды в местах их обитания. Сравнение расчетных значений температуры воды [6] на глубине сбора материалов показало, что районы лова в водах Фолклендских островов, Новой Зеландии и банки Флемиш-кап характеризуются среднегодовыми значениями от 3.5 до 5 С°, а воды островов Крозе, Кергелен и Маккуори, морей Росса, Лазарева и Уэдделла, вод Срединно-Атлантического хребта, Гренландии и Исландии температурами от 0 до 2.5 С°.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-00230, <https://rscf.ru/project/23-24-00230/>

Список литературы

- 1) Small G.J. A review of the bathyal fish genus *Antimora* (Moridae: Gadiformes) // Proceedings of the California Academy of Sciences №42 (13). 1981. С. 341–348
- 2) Iwamoto T. The abyssal fish *Antimora rostrata* (Günther) // Comparative Biochemistry and Physiology Part B №1(1). 1975. С. 7–11

- 3) Horn P.L., Sutton C.P. An assessment of age and growth of violet cod (*Antimora rostrata*) in the Ross Sea, Antarctica // *Polar Biology* №38(9). 2015. С. 1553–1558
- 4) Новиков Н.П., Тимохин И.Г. Антимора *Antimora rostrata* (Moridae) подводных поднятий южной части Индийского океана // *Рибне Господарство України* №1(1). 2009. С. 2–5
- 5) Коростелев Н.Б., Баньон П., Орлов А.М. Рост и возраст клюворылой антиморы *Antimora rostrata* (Moridae) в водах банки Флеминг-кап (Северо-западная Атлантика). *Вопросы ихтиологии* №62(5). 2022. С. 596-608
- 6) Boyer T.P., Garcia H.E., Locarnini R.A., Zweng M.M., Mishonov A.V., Reagan J.R., Weathers K.A., Baranova O.K., Seidov D., Smolyar I.V. World Ocean Atlas 2018 NOAA National Centers for Environmental Information // Dataset. <https://www.ncei.noaa.gov/archive/accession/NCEI-WOA18>. Accessed [24.12.2022]

СООТНОШЕНИЕ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ БИОПРОДУКТИВНОСТИ ЗООПЛАНКТОНА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

Логинова Н.Б., Поважный В.В.

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: первичная продукция, зоопланктон, хлорофилл-А, Море Лаптевых, Северно-Ледовитый Океан.

Исследования, выполненные в последние два десятилетия в Северном Ледовитом океане (СЛО), выявили заметные изменения качественного состава ледового покрова, гидрофизических характеристик поверхностных вод, и, как следствие, видового состава биологических сообществ, развивающихся в водно-ледовой среде. Сокращение площади многолетних льдов и одновременное возрастание доли сезонных льдов и доли свободных ото льда водных пространств, в целом, привело к изменениям функционирования экосистемы пелагиали СЛО. В настоящее время, в его центральных районах нет постоянных наблюдений за динамикой современных процессов, однако важность получения такой информации трудно переоценить. Серьезный прогресс в гидробиологических исследованиях моря Лаптевых, достигнутый с начала 90-х гг. XX века, привел к уточнению параметров его углеродного цикла на основе измерений хлорофилла-А (хл-А). Чтобы лучше понять особенности углеродного цикла в море по данным измерений хл-А, большое значение имеют прямые измерения первичной продукции (ПП). Метод измерения ПП на основе кислородных оптодов оказался удобным и достаточно чувствительным для применения в Арктических морях [1].

Целью настоящей работы является оценка межгодовых колебаний продукции органического вещества в море Лаптевых по материалам состоявшихся экспедиций «Арктика-2018» (август – сентябрь 2018 г.), «Трансарктика – 2019» (4 этап, август – октябрь 2019 г.) и «Арктика – 2021» (август-сентябрь 2021 г.), а также установление связи первичной продукции органического вещества в пелагиали моря Лаптевых с накоплением полярных и неполярных липидов в мезозоопланктоне в осенний период. Определение концентрации хл-А проводилось по стандартным горизонтам (2 – 100м) с помощью батометров Нискина в составе гидрологического комплекса «Розетта». Определение ПП планктона кислородной модификацией скляночного метода на двух горизонтах (поверхность, горизонт хлорофилльного максимума). Определение ПП выполнялось с использованием оптического датчика растворенного кислорода PreSens Fibox 4 в термостатированном люминистате оригинальной конструкции прямо на борту судна. Отбор количественных проб зоопланктона был выполнен сетью WP2 с размером ячеек 150 мкм.

По данным прямых измерений валовой и чистой первичной продукции органического вещества планктона, выполненных в 2018 – 2021 гг., были оценены ее межгодовые колебания. Наибольшие значения валовой и чистой первичной продукции морей Карского и Лаптевых в летне-осенний период отмечались в 2018 г. Валовая первичная продукция (ВПП) в среднем составила $1089 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$ при колебаниях от 7280 до $10 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$, чистая первичная продукция (ЧПП) в среднем составила $250 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$ при колебаниях от 2760 до $-878 \text{ мгС/м}^2/\text{сут}$. Значения данных показателей в указанном районе в 2021 г варьировали для ВПП от 42 до $420 \text{ мг С/м}^2/\text{сут}$ увеличиваясь по направлению к склону шельфа. ЧПП при этом принимала слабоотрицательные значения. При этом в подповерхностном слое пикноклина (16 – 28 м) ВПП составляла от 670 до $940 \text{ мг С/м}^2/\text{сут}$ также увеличиваясь по направлению к склону шельфа. ЧПП при этом колебалась от -29 до $63 \text{ мг С/м}^2/\text{сут}$. В на шельфе морей Карского и Лаптевых первичная продукция органического вещества изменялась разнонаправленно и в целом была в 3 – 5 раз ниже значений, полученных

в области континентального склона. Географические особенности распределения данного показателя объясняются активной гидродинамикой в области влияния Арктического вдольберегового течения, несущего воды Атлантического происхождения, богатые биогенными элементами. Межгодовые колебания показателя также могут быть связаны с изменениями интенсивности зимней конвекции в районе континентального склона.

В результате обработки проб мезозoopланктона в исследованных районах моря Лаптевых не было отмечено новых для района видов или не описанных ранее особенностей их распределения [2,3]. На мелководном шельфе моря доминировали мелкие представители рр. *Pseudocalanus*, *Oithona*, *Drepanopus* (*Calanoida*, *Cyclopoida*), а также представители желетелого и меропланктона. В северной части шельфа моря Лаптевых в сообществе было отмечено усиление роли крупных представителей р. *Calanus* (в основном - *C. glacialis*). В области континентального склона и в глубоководной части моря в районе влияния арктических водных масс комплекс трех видов р. *Calanus* (*C. glacialis*, *C. hyperboreus*, *C. Finmarchicus*) абсолютно доминировал по биомассе, при этом по численности в пробах преобладали мелкие циклопы рр. *Oithona* и *Oncea*.

На основе измерений общей биомассы сетного планктона и содержания в нем общих липидов в осенний период предварительно был описан метод интегральной экспресс-оценки биопродуктивности Арктических морских экосистем. Было отмечено, что районам с высокой (более 1,5 г С/м²/сут) первичной продукцией планктона, оцененной по результатам прямых измерений, соответствует содержание общих липидов в сетном планктоне более 10 % от общей сырой биомассы. Высокая общая биопродуктивность планктона отмечается в Арктических морях в области материкового склона. Полученный результат позволяет оценивать базовые параметры цикла углерода Арктических морей по данным хорошо воспроизводимых стандартных измерений.

Список литературы

- 1) Campbell K., Mundy C.J., Gosselin M. et al. Net community production in the bottom of first-year sea ice over the Arctic spring bloom // *Geophysical Research Letters*. – 2017. – V. 44. – №. 17. – P. 8971-8978.
- 2) Abramova E., Tuschling K. A 12-year study of the seasonal and interannual dynamics of mesozooplankton in the Laptev Sea: significance of salinity regime and life cycle patterns // *Global and Planetary Change*. – 2005. – V. 48. – №. 1-3. – P. 141-164.
- 3) Кособокова К.Н. Зоопланктон арктического бассейна. Структура сообществ, экология, закономерности распределения. - М.: ГЕОС, 2012.- 272 с. ISBN 978-5-89118-635-4

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОРМЫ ОТОЛИТОВ АФРИКАНСКОЙ СКУМБРИИ В ВОДАХ ЦВА

Никитенко А.И.¹, Строганов А.Н.², Артеменков Д.В.³, Беляев В.А.³

¹Филиал по пресноводному рыбному хозяйству ФГБНУ "ВНИРО", пос. Рыбное

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

³Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, г. Москва

Ключевые слова: отолиты, скумбрия, *Scomber colias*, Центрально-Восточная Атлантика.

Проблема внутривидовой дифференциации вида считается одной из основополагающих в рыбохозяйственной и фундаментальной науке. Безусловно, четкое выделение локальных популяций, являющихся единицами запаса, лежит в основе успешной эксплуатации рыбных ресурсов [1, 2]. В данном исследовании метод сравнительного анализа формы отолитов приводится в качестве метода изучения пространственной организации скумбрии.

Изучение формирования скоплений рыб имеет комплексный характер. Так, на выявление скоплений влияют сезонность и динамика океанологических процессов, таких как апвеллинг, постоянные течения и фронтальные зоны. Зона Центрально-Восточной Атлантики характеризуется большой пространственной изменчивостью и неоднородностью океанологического режима, что неоднородно позволило определить популяционную структуру скумбрии [3, 4].

Таким образом, литературные данные противоречивы в части популяционной структуры изученного объекта и даже видов скумбрии распределяющихся в ЦВА. По информации первого источника представляющего обзор ФАО по распределению видов и их популяций выделяют два вида скумбрии в регионе: *Scomber colias* [5] и *Scomber japonicus* [6].

Отолиты скумбрии были собраны в исключительных экономических зонах Марокко и Мавритании на акватории между 16°0'-23°58' с.ш., 16°25'-17°50' з.д. в ходе проведения ресурсных исследований в 2014-2017 гг. Было проанализировано 1900 отолитов скумбрии, у которых проведено алгебраическое описание их формы.

Lombarte и соавторы в 2006 г. создали открытый онлайн каталог изображений отолитов рыб (AFORO) постоянно пополняемый. Решено проверить собранную информацию по отолитам для идентификации скумбрии с имеющимися видами семейства в базе AFORO. Найдены изображения скумбрии обычной *Scomber colias* из региона Северо-Восточной Атлантики и обработаны таким же принципом программой Shape ver. 1.3. Рассчитаны первые главные компоненты (PC1) и их средние значения у правых отолитов *Scomber colias* и у западно-африканской скумбрии, собранной в период исследований 2014-2017 гг. Значение первой главной компоненты *Scomber colias* – 0,021±0,006, а у отолитов западно-африканской скумбрии – 0,019±0,005. Данный факт подтверждает отсутствие неоднородной структуры западно-африканской скумбрии и тем более наличие двух видов в исследуемом регионе.

Согласно проведенному анализу формы отолитов, за 99% вклада отвечают первые 11 гармоник. Используя значения коэффициентов Фурье для первых 11 гармоник в программе PrinComp, входящей в пакет Shape ver. 1.3, были получены значения главных компонент. За 95% всей изменчивости отвечают первые 17 ГК. Первая ГК отвечает за 31,6% всей изменчивости. Две первые ГК совокупно отвечают за 52,8% всей изменчивости. За 100% всей изменчивости, согласно расчету, отвечают 72 ГК.

При исследовании особенностей формы отолитов, которыми обусловлена дисперсия значений ГК, значения ГК1 (PC1), главным образом, описывают вытянутость формы отолита, форму антирострума и выраженность дорсальной части отолита. Значения ГК2 (PC2), в основном, характеризуют выраженность ростурма, а значения ГК3 (PC3) – ширину отолита.

Поэтому сравнение индексов формы отолитов скумбрии в водах Марокко и Мавритании не выявило достоверных различий. Результаты, полученные в ходе анализа формы отолитов, свидетельствуют в пользу единства группировки скумбрии в исследованный период на акватории ИЭЗ Марокко и Мавритании.

Работа выполнена в рамках ежегодного государственного мониторинга ФГБНУ "ВНИРО" основных промысловых рыб в Центрально-Восточной Атлантике в 2004-2017 гг.

Список литературы

- 1) Доманевский Л.Н. Влияние океанологических условий на формирование скоплений рыб у Атлантического побережья Африки / Л.Н. Доманевский, М.В. Доманевская // Сб. Промыслово-океанологические исследования в Атлантическом океане и Юго-Восточной части Тихого океана. – 1988. – 140 с.
- 2) Garcia S. Distribution, migration and spawning of the main fish resources in the northern CECAF area / S. Garsia // CECAF/ECAF SERIES 82/25. – Rome: FAO. – 1982. – P. 136–146.
- 3) Никитенко А.И. К возможности использования метода отолитометрии в изучении популяционной организации Восточной скумбрии *Scomber japonicus* в Западно-африканских водах / А.И. Никитенко, Д.В. Артеменков // Комплексные исследования Мирового океана: материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых. – Москва. – 2017. – С. 390–392.
- 4) Мельников С.П. Изучение популяционной структуры восточной скумбрии в центрально-восточной Атлантике на основе анализа формы ее отолитов / С.П. Мельников, Д.В. Артеменков, А.И. Никитенко, Д.С. Сухарев // IV Международный Балтийский морской форум: матер. конф. Калининград. – 2016. – С.40–43.
- 5) Razniewski J. 1967. Some observations on the biology of *Scomber colias* of the northwest african shelf. ICESCM 1967/J:4. 4 pp.
- 6) Habashi B. Observations on the biology of *Scomber japonicus* off Northwest Africa / B.B. Habashi, J. Wojciehowski // ICES Doc. – С.М. –1973. – 9 pp.

ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ И ПЛОТНОСТЬ ПОСЕЛЕНИЙ ПОЛИХЕТ-ДЕТРИТОФАГОВ В ВЕРШИННОЙ ЧАСТИ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ (2013—2019 ГГ.)

Подзорова Д.В.

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: таксоцен полихет, вселенцы, *Streblospio gynobranchiata*, *Heteromastus filiformis*, *Capitella capitata*.

Детритоядные полихеты являются значимым компонентом сообществ рыхлых грунтов. Они перерабатывают отмершую органику, делая ее более доступной для бактерий. Также, прокладывая ходы в грунте и перемешивая его, они делают возможным проникновение кислорода вглубь осадков [2]. Севастопольская бухта – водоем эстуарного типа, ее вершинная часть характеризуется пониженной волновой активностью, дно сильно заилено и представляет собой биотоп, благоприятный для обитания полихет-детритофагов. Исследования полихет в Севастопольской бухте проводили с конца 19 века [4; 1]. В 2007 г. в бухте впервые обнаружен вселенец *S. treblospio gynobranchiata*, которого через некоторое время признали натурализовавшимся и предположили, что его присутствие в бухте может изменить структуру таксоценона полихет [5; 6]. Целью наших исследований было определение видового состава и плотности детритоядных полихет вершинной части Севастопольской бухты в 2013–2019 гг.

Материал собирали в осенний сезон 2014, 2015, и 2019 г. на 4 станциях (всего проанализировали 20 проб). Грунт отбирали дночерпателем Петерсона площадью 0,04 м², промывали через сито с размером ячеек 0,5 мм и фиксировали 4 % раствором нейтрализованного формалина. Глубина в районе отбора проб – 2–8 м, соленость 17–18 ‰, температура воды – 9–10 °С. Для оценки достоверности значений средней численности использовали доверительный интервал с уровнем значимости 95 %.

Зарегистрировали 10 детритоядных видов полихет: *S. gynobranchiata* Rice & Levin, 1998; *Paradoneis harpagonea* (Storch, 1967), *Heteromastus filiformis* (Claparède, 1864), *Capitella capitata* (Fabricius, 1780), *Polydora cornuta* Bosc, 1802, *Nephtys hombergii* Savigny in Lamarck, 1818, *Microspio mecznikowiana* (Claparède, 1869), *Terebellides stroemii* Sars, 1835, *Prionospio cirrifera* Wirén, 1883, *Alitta succinea* (Leuckart, 1847). Наиболее часто встречающиеся виды в 2013 г. – *S. gynobranchiata*, *H. filiformis*; в 2015 – *S. gynobranchiata*, *H. filiformis*, *C. capitata*, в 2019 – *S. gynobranchiata*. Средняя плотность поселений полихет в 2013 г. – 1719±717 экз.●м⁻²; в 2015 г. – 700±141 экз.●м⁻²; в 2019 г. – 869±788. Наибольшей плотности достигали массовые виды. В 2013 г. плотность *S. gynobranchiata* и *H. filiformis* составляла 1194±727 экз.●м⁻² и 500±753 экз.●м⁻² соответственно; в 2015 плотность *C. capitata* – 35±15 экз.●м⁻², *H. filiformis* – 444±146 экз.●м⁻², *S. gynobranchiata* 191±119 экз.●м⁻²; в 2019 плотность *S. gynobranchiata* 647±852 экз.●м⁻².

Полихеты-детритофаги по типу питания делятся на собирающих детрит на поверхности грунта и безвыборочных глотальщиков грунта. Считается, что виды из разных пищевых категорий могут конкурировать друг с другом за пищевой ресурс [3]. В наших сборах к первой группе относились *S. gynobranchiata*, *P. cornuta*, *Pr. cirrifera*, *M. mecznikowiana*; ко второй – *C. capitata* и *H. filiformis*. Численность собирающих детритфагов (в экз.●м⁻²) в 2013 г. – 1200±626, безвыборочных глотальщиков – 500±753; в 2015 г. – 191±119 и 479±139 соответственно, в 2019 г. – 713±297 и 141±27 соответственно. Достоверные отличия численности полихет двух трофических групп наблюдались только в 2019 г. Наши исследования показали стабильное присутствие вселенца *S. gynobranchiata* в кутовой части бухты, однако численность его варьирует в широких пределах от 13 (ст. 3, 2013) до 2975 (ст.5, 2013 г.) экз.●м⁻².

В целом таксоцен детритоидных полихет в вершинной части Севастопольской бухты в 2013–2019 гг. характеризовался относительно постоянным составом массовых видов. Во все годы средняя плотность полихет была относительно высокой, однако показатели плотности видов на отдельных станциях отличались высокой вариабельностью. Наличие поселений полихет различных пищевых стратегий в течение всего периода исследований позволяет предположить что острая конкуренция между ними отсутствует. Регистрация высокой численности поселений *S. gynobranchiata* во все годы свидетельствует о том, что этот новый для акватории Севастополя вид успешно натурализовался и вошел в состав нативных сообществ.

Работа выполнена по теме госзадания № 121030100028-0 «Закономерности формирования и антропогенная трансформация биоразнообразия и биоресурсов Азово-Черноморского бассейна и других районов Мирового океана».

Список литературы

- 1) Болтачева Н.А. Полихеты Севастопольской бухты (Чёрное море) / Н.А. Болтачева, С.А. Мазлумян // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного ун-ту ім. Володимира Гнатюка. Сер. Біологія. Спеціальний випуск «Гідроекологія». - 2005. Вип. 4 (27). - С. 25–27.
- 2) Виноградов А.К. Экология морских портов (Азово-Черноморский бассейн): монография / А.К. Виноградов, Ю.И. Богатова, И.А. Синегуб. - Одесса: Астропринт, 2014. - 568 с.
- 3) Лосовская Г.В. Экология полихет Чёрного моря: монография. - Киев: Наук. думка. - 1977. - 92 с.
- 4) Якубова Л.И. Список Archiannelidae и Polychaeta Севастопольской бухты Чёрного моря / Л.И. Якубова // Изв. АН СССР. Отд. физ.-мат. наук. - 1930. - С. 863-881.
- 5) Boltachova N.O. Changes in the structure of macrozoobenthos community under the influence of invasive species (Black Sea, Sevastopol Bay). N.O. Boltachova & O.A. Kolesnikova // V International Symposium of Ecologists of Montenegro: The Book of Abstracts and Programme. – Tivat, 02-05.10.2013. - p. 93-94.
- 6) Boltachova N.A. The population dynamics and reproduction of *Streblospio gynobranchiata* (Annelida, Spionidae), an alien polychaete worm, in the Sevastopol Bay (The Black Sea). Boltachova, N.A., Lisitskaya E.V., Podzorova D.V. // Ecologica Montenegrina. - 2015. - V. 4. - p. 22-28.

ВИДОВОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ФИТОПЛАНКТОНА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2021 ГОДА (ГАЙОТ КОКО, ИМПЕРАТОРСКИЙ ХРЕБЕТ, ТИХИЙ ОКЕАН)

Зинов А.А., Пономарева А.А.

"Национальный научный центр морской биологии имени А.В. Жирмунского" Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток

Ключевые слова: фитопланктон, Императорский хребет, видовое разнообразие, диатомовые, динофлагелляты.

Императорский Хребет - система поднятий океанического дна, располагающаяся в северной части Тихого Океана. Протяженность подводного хребта составляет около 1500 км в меридиональном направлении. Для района подводных гор характерно наличие сложной и изменчивой вихревой структуры гидрофизических полей. Известно, что продукционные процессы в большей степени зависят от вихревых систем, которые локализованы как вблизи, так и на значительном удалении от подводных гор [1].

Фитопланктон - важнейший компонент морских экосистем. Являясь первичным продуцентом, создает органическое вещество и дает начало процессам его трансформации в морских сообществах.

В большинстве работ по исследованию Императорского хребта данные по фитопланктону описываются только по показаниям хлорофилла а. В своей работе Федосова Р.А. [2] показала, что во время изучения мезопланктона Гавайского хребта в 1970 г. фитопланктон отмечали на протяжении всего года во время всех гидробиологических съемок. Однако массовое развитие микроводорослей было зафиксировано только весной за счет массового развития диатомовых водорослей. Динофлагелляты встречались в небольшом количестве во все сезоны. Данные по видовому составу, по эколого-географическому распределению видов микроводорослей в районе Императорского хребта в литературе отсутствуют.

В связи с этим целью работы был отбор сетных и батометрических проб фитопланктона в районе Императорского хребта для изучения видового состава и количественных характеристик.

За время работ в районе исследования (гайот Коко) было выполнено 18 станций планктонной сетью (ячейка 45 мкм). Облавливался горизонт 0-50 м, скорость поднятия сети 0,5 м/с. Также были взяты пробы с гайотов Odjin и Yuriniaku. Пробы зафиксированы раствором Утермеля [3]. Одновременно на станциях выполняли вертикальную батометрическую съемку с использованием пробоотборной системы («Розетта») с СТД-зондированием. Пробы отбирали с трех горизонтов: поверхностного, пика флюоресценции и промежуточного между ними. С каждого горизонта отбирали по 2 л воды, фиксировали раствором Утермеля.

Собранный материал был частично обработан в ходе экспедиции на борту НИС «Академик Лаврентьев». В результате проведенных работ в фитопланктоне исследуемой акватории было выделено 68 видов и внутривидовых таксонов, относящихся к 4 отделам микроводорослей: Dinophyta (динофитовые), Bacillariophyta (диатомовые), Chrysophyta (золотистые) и Cyanophyta (сине-зеленые).

По числу видов преобладали динофлагелляты (Dinophyta) — 47 видов (69% от общего числа видов), диатомовые (Bacillariophyta) — 19 видов (28%), золотистые (Chrysophyta) — 1 вид (1,5%) и сине-зеленые (Cyanophyta) - 1 вид (1,5%) (табл. 1). Среди динофитовых наиболее богатыми видами был род *Ceratium* (14 видов) и *Dinophysis* (10 видов), среди диатомовых — *Chaetoceros* (5 видов).

В результате анализа обработанного материала отмечено, что диатомея *Hemiaulus hauckii* широко распространен в районе гайота Коко, вид обнаружен на 70% станциях. Данный таксон является тропическим и встречается в прибрежных районах, в пределах континентальной ступе-

ни. Среди динофлагеллят наиболее распространенными видами по станциям являются *Ceratium furca*, *Ceratium tripos* и *Dinophysis rotundata*. Два вида *Ceratium* относятся к панталассному типу микроводорослей, среди них *C. furca* космополит, а *C. tripos* тропическо-аркто-бореальный вид. *Dinophysis rotundata* относится к океаническому типу и является космополитом.

Среди обнаруженных видов микроводорослей, экологическую характеристику удалось дать только 19 видам, среди которых доминировали океанический и неретический тип (по 37% от общего числа), а географическую — 20 видам, среди которых доминировали космополиты (55%).

По результатам обработанной части проб пока нельзя сделать однозначных выводов, но наблюдается тенденция к преобладанию в сообществе фитопланктона представителей динофлагеллят.

В составленном аннотированном списке присутствуют микроводоросли, видовая принадлежность которых требует уточнения с применением электронной микроскопии. Также в дальнейшем будет проведен количественный подсчет фитопланктона в районе исследования и картина распределения сообщества микроводорослей в районе гайота Коко (Императорский хребет) станет окончательной.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Исследования проведены на площадке ЦКП «Приморский океанариум».

Список литературы

- 1) Дарницкий В.Б. К истории исследования подводных гор Тихого океана (океанологические процессы) / Изв. ТИНРО. – 2005 – Т. 141. – С. 255-283.
- 2) Федосова Р.А. Распределение биомассы мезопланктона в районе Гавайского подводного хребта / Изв. ТИНРО. – 1974 – Т. 92. – С. 38–42.
- 3) Utermöhl H. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton / Methodik. Internationalen Verein Limnologie. Mitteilungen. – 1958. – Vol. 9. – P. 1–38.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СООБЩЕСТВ УГЛЕВОДОРОДОКИСЛЯЮЩИХ МИКРООРГАНИЗМОВ БАРЕНЦЕВА И ПЕЧОРСКОГО МОРЕЙ

Пыркин В.О.¹, Гавирова Л.А.¹, Строева А.Р.², Меркель А.Ю.², Ахманов Г.Г.¹,
Бонч-Осмоловская Е.А.¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²ФИЦ Биотехнологии РАН, г. Москва

Ключевые слова: Ключевые слова: углеводородокисляющие микроорганизмы, морская микробиология, молекулярная экология, NGS-профилирование.

Важной мировой тенденцией последних лет является смещение морских нефтепоисковых и промысловых работ в акватории, где располагается большая часть мировых запасов нефти и газа. Регион Баренцева моря притягивает нефтяную промышленность России и Норвегии [1]. Кроме того, что именно сейчас проблема нефтяного загрязнения Арктических морей стоит очень остро, важно не забывать, что нефть всегда была частью морской среды на протяжении миллионов лет, и микроорганизмы, использующие ее в качестве источника углерода, встречаются повсеместно, от тропиков до полярных широт [2].

Данное исследование направлено на изучение углеводородокисляющих микроорганизмов (УВОМ) Баренцева и Печорского морей с помощью анализа микробных сообществ нативных образцов (грунт и морская вода), выявления возможных причин различий в таксономическом составе и получения накопительных культур с различными углеводородными субстратами.

Образцы грунта и придонной морской воды получены в ходе 4-х экспедиций. В октябре 2019 г. в ходе экспедиции ИС «Капитан Беклемишев» в восточную часть Баренцева моря и южную часть Печорского моря. Во время рейса ИС «Картеш» в окрестности МЛСП «Приразломная», август 2020 г. В ходе экспедиций ТТР-19/20 (2020, 2021 гг.) по программе «Обучение-через-ис-следование» на научно-исследовательском судне «Академик Николай Страхов», организованной МГУ имени М.В. Ломоносова при поддержке Министерства высшего образования и науки РФ в северо-восточную и восточную часть Баренцева моря.

Микробные сообщества грунта, воды и накопительных культур (НК) Баренцева и Печорско-го морей были проанализированы с помощью метода высокопроизводительного NGS-секвенирования по гену 16s рРНК. Коровый микробиом (КМ) воды Баренцева моря включает в себя представителей семейства *Nitrospiraceae*, SUP05 cluster, Clade Ia, *Polaribacter*, *Luteolibacter* и *Candidatus Nitrosopumilus*. КМ грунта Баренцева моря представлен родом *Woeseia*, семейством *Desulfobulbaceae*, NB1-j, Sva0081 sediment group и Sva1033. КМ морской воды Печорского моря представлен семейством *Nitrospiraceae*, *Amylibacter*, SAR92_clade, Clade Ia, *Polaribacter* и SAR86. КМ грунта Печорского состоит из семейств *Sandaracinaceae*, *Desulfobulbaceae*, порядков Sva1033, BD7-8 и родов *Woeseia* и *Methyloceanibacter*.

На основе анализа β -разнообразия отмечено, что микробные сообщества воды, грунта и накопительных культур отличаются друг от друга крайне достоверно со статистической точки зрения. Анализ α -разнообразия (Индекс Шеннона и Chao1) показал, что микробные сообщества морской воды и грунта Баренцева моря обладают высоким разнообразием, по сравнению с Печорским морем, что может свидетельствовать о наличии факторов, снижающих данный показатель в Печорском море.

На основе NGS секвенирования гена 16s рРНК были получены микробные профили по всем вариантам накопительных культур УВОМ. НК Баренцева моря характеризуются доминированием бактерий широкого спектра потребления субстратов таких, как *Pseudoalteromonas*, *Pseudomonas*

и узкоспециализирующихся *Porticoccus*. В Печорском море отмечается обилие известных УВОМ, таких как *Psychrobacter*, *Rhodococcus*, *Dietzia*, *Sphingorhabdus*. Для изучения связи таксонов с используемыми субстратами в накопительных культурах мы провели однофакторный анализ (t-test, ANOVA). По результатам данного анализа все доминирующие таксоны не случайно распределены с углеводородами p-value = от $1.4 \cdot 10^{-7}$ до $1.48 \cdot 10^{-28}$. При использовании нефти в накопительных культурах наблюдается неслучайное распределение *Pseudoalteromonas*, *Pseudomonas*, *Oleispira*. В вариантах культивирования с н-нонаном и н-ундеканом - *Rhodococcus*, *Hyphomonas*, *Psychrobacter*, *Sphingorhabdus*, *Dietzia*. В случае использования фенантрена наблюдается распределение *Porticoccus*, *Janibacter*, *Psychrobacter Parafrigoribacterium*, *Arthrobacter*, *Nocardioides*.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ 20-54-20001 (Норв_т).

Список литературы

- 1) Gerdes B. Impact of oil contamination and bioremediation treatments on the composition and degradation efficiency of polar bacterial sea-ice communities : дис. – Universität Bremen, 2006.
- 2) Rizzo C., Malavenda R., Gerçe B., Papale M., Syldatk C., Hausmann R., Amalfitano S. Effects of a simulated acute oil spillage on bacterial communities from Arctic and Antarctic marine sediments // Microorganisms. – 2019. – Т. 7. – №. 12. – С. 632.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ЭРИТРОПОЭЗА В ГЕМОПОЭТИЧЕСКИХ ТКАНЯХ КЕФАЛИ-СИНГИЛЯ (*CHELON AURATUS* (RISSE, 1810)) НА ПРОТЯЖЕНИИ ГОДОВОГО ЦИКЛА

Рокотова А.Г., Рычкова В.Н., Кухарева Т.А., Солдатов А.А.

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: костистые рыбы, гемопоэз, кровь, головная почка.

Анализ состояния системы красной крови на протяжении годового цикла позволил выявить в ней определенные периодические изменения. Это выражалось в моноцикличности динамики концентрации гемоглобина и числа эритроцитов крови [2], что косвенно отражало изменение баланса между продукционными и деструктивными процессами. О нерегулярности эритропоэтических процессов в гемопоэтической ткани свидетельствует и значительная продолжительность жизни клеток красной крови у костистых рыб, определенная при помощи ³H-тимидина и флуоресцентных зондов [1,3]. Она составила 270-310 дней.

Известно, что в период нереста состояние многих физиологических систем претерпевает наиболее радикальные изменения [6]. Система красной крови в этом отношении не является исключением. Отмечено, что у мригала (*Cirrhinus mrigala*) концентрация гемоглобина и число эритроцитов в крови в преднерестовый период существенно понижается [5], что может быть связано с перераспределением пластических ресурсов организма в пользу генеративной ткани. Аналогичные изменения происходят у рыб и при искусственной стимуляции нереста гормональными препаратами [4]. Насколько нерест определяет сезонную динамику гематологических характеристик крови у рыб до конца неясно.

Цель работы – исследовать клеточный состав эритроидных элементов крови и гемопоэтической ткани у кефали-сингиля (*Chelon auratus* Risso, 1810) и соотнести его с изменением числа эритроцитов в крови на протяжении годового цикла.

Материал и методы. В работе использовали взрослых особей обоих полов в возрасте 4-6 лет: вес тела – 183-275 г, длина – 21-28 см. Для предотвращения развития состояния манипуляционного стресса за 60-70 минут до отбора проб рыб наркотизировали (уретан).

Кровь получали пункцией хвостовой артерии. В качестве антикоагулянта применяли гепарин (Рихтер, Венгрия). Образцы передней почки (пронефроса) получали путем вскрытия брюшной полости. Число эритроцитов в крови подсчитывали в камере Горяева. Одновременно изготавливали мазки крови и отпечатки передней почки, которые окрашивали по комбинированному методу Паппенгейма (Май-Грюнвальд + Романовский-Гимза). На препаратах определяли относительное содержание незрелых эритроидных форм, находящихся на разных стадиях созревания: пронормобластов, базофильных и полихроматофильных нормобластов.

Результаты. Анализ числа эритроцитов в крови кефали показал, что максимальные величины были отмечены в зимний период времени, а минимальные – в летние месяцы. При этом рост числа клеток красной крови приходился на нерестовый и постнерестовый период.

В массе циркулирующая кровь была представлена зрелыми оксифильными эритроцитами, имеющими эллипсоидную форму. Незрелые эритроидные формы встречались редко и были представлены в основном полихроматофильными нормобластами (ПН), реже базофильными нормобластами (БН). БН имели округлую форму, базофильную цитоплазму и относительно крупное ядро с высокой долей эухроматина. ПН представляют более дифференцированные клеточные системы. Они приобретали эллипсоидную форму, цитоплазма сочетала базофильные и ацидофильные свойства (цвет серый), ядро крупное с хорошо выраженной перинуклеарной зоной.

Анализ присутствия незрелых эритроидных форм в крови кефалей на протяжении годового цикла показал нерегулярность их появления и относительного содержания в кровяном русле.

Их минимальный уровень (не более 2 % клеточной массы) отмечали в начале весны (март), а максимальных значений (6-7 % клеточной массы) этот показатель достигал в начале осени, что совпадало с нерестовым и пост нерестовым периодом. При этом клетки более ранних генераций (БН) наблюдались в крови только в постнерестовый период (сентябрь-октябрь). ПН же встречались на протяжении всего года с явным максимумом в начале осени. Наблюдаемые изменения были статистически значимы ($p < 0,05$).

В головной почке популяция эритроидного ростка гемопоэза была представлена тремя видами клеток: пронормобластами (Про), БН и ПН. Особенности морфологии двух последних форм были рассмотрены выше. Про – наименее дифференцированная группа эритроидных элементов. Это небольшие округлые клетки. Крупное ядро с высокой долей эухроматина занимает почти весь их объем. Слабо базофильная цитоплазма представлена в виде узкой полосы.

Размеры популяции эритроидных элементов в головной почке были не постоянны и имели выраженную динамику на протяжении годового цикла. Она полностью совпадала с изменением числа эритроцитов и незрелых эритроидных форм в крови кефали. Максимальные размеры очага эритропоэза в головной почке отмечали в постнерестовый период (сентябрь-октябрь). На эритроидные формы приходилось до 14 % от остальной клеточной массы отпечатков пронефроса. Минимальные значения были зарегистрированы на начало весны (март) – 3-6 %. Различия были статистически выражены ($p < 0,05$). Аналогичную динамику отмечали со стороны Про и БН. Их присутствие в головной почке кефали отмечали на протяжении всего годового цикла. При этом изменений со стороны ПН не наблюдали.

Работа поддержана РФФ проект № 23-24-00061.

Список литературы

- 1) Золотова Т.Е. Экспериментальное исследование кроветворения у рыб // Автореф. диссерт. на соиск. учен. степ, канд наук. М., МГУ.-1989. – 1989.
- 2) Al-Hassan L.A.J., Al-Abood A.Y., Al-Seyab A.A. Seasonal variations in the haemoglobin concentration and haematocrit values of *Silurus triostegus* // *Acta Ichthyologica et Piscatoria*. – 1990. – Т. 20. – №. 1. – С. 99-103.
- 3) Fischer U., Ototake M., Nakanishi T. Life span of circulating blood cells in ginbuna crucian carp (*Carassius auratus langsdorfii*) // *Fish & Shellfish Immunology*. – 1998. – Т. 8. – №. 5. – С. 339-349.
- 4) Hilge V., Klinger H. Changes in the hemogram of the male European eel (*Anguilla anguilla* L.) during induced maturation // *ICES CM*. – 1978. – С. M4.
- 5) Raizada M.N., Singh C.P. Seasonal variations in the erythrocyte counts and haemoglobin content of *Cirrhinus mrigala* (Ham.) // *Proceedings of the Indian National Science Academy. Part B. Biological sciences*. – 1981.
- 6) Shul'man G.E., Love R.M. *The biochemical ecology of marine fishes*. – Academic Press, 1999.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И «ЦВЕТЕНИЯ» ФИТОПЛАНКТОНА В ЛИТОРАЛИ КУРШСКОГО ЗАЛИВА В 2018-2021 ГГ.

Смирнова М.М.¹, Рыльков О.В.²

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Национальный парк «Куршская коса», пос. Рыбачий

Ключевые слова: цианобактериальные «цветения», фитопланктон, температура воды, гидробиологические сезоны, Куршский залив.

Куршский залив – крупнейшая лагуна Балтийского моря, полузакрытая, мелководная, преимущественно пресноводная, гипертрофная. Прибрежная зона Куршского залива активно используется в рекреационных целях. С 2000-х годов «гиперцветения» с доминированием потенциально токсичных видов цианобактерий из родов *Microcystis*, *Aphanizomenon*, *Woronichinia*, *Planktothrix*, *Dolichospermum* стали регулярными и более продолжительными; биомасса фитопланктона достигала 133 г/м³ и 408 г/м³ (в закрытых участках), что соответствует «гиперцветению» (> 100 г/м³) [1, 2]. Участвовавшие цианобактериальные «цветения», ухудшающие физико-химические свойства воды, и наблюдающиеся в последние десятилетия климатические изменения обуславливают актуальность данного исследования. Цель данной работы – анализ динамики некоторых гидрологических показателей и фенологических проявлений «цветений» фитопланктона на станции наблюдений в период 2018-2021 гг.

Станция наблюдения расположена в литорали западного побережья южной части Куршского залива (55°02'02,3"N 20°39'15,4"E). Измерения проводились по рабочим дням, утром. Температуру воды измеряли спиртовым термометром (цена деления шкалы 1 °С, диапазон измерения от -2 до +40 °С.), прозрачность воды – диском Секки. Значения температуры воды для определения границ гидрологических сезонов приняты по работе [3]. При переходе температуры воды через отметку +4 °С наступает гидрологическая весна, через +15 °С – гидрологическое лето, при обратном переходе через +15 °С наступает гидрологическая осень и при переходе через +4 °С – гидрологическая зима. Проанализированы гидрологические показатели на станции наблюдений, фенологические изменения, связанные с развитием фитопланктона (на основе фотоархива национального парка и собственных наблюдений) в исследуемый период. Определены время наступления и продолжительность гидрологических сезонов.

За период исследований среднегодовые значения температуры воды варьировали от +10 °С (в 2018 г.) до +14 °С (в 2021 г.). Средняя температура воды для гидрологического лета составляла +19-20 °С. Максимальная температура воды (+28 °С) зафиксирована в 2021 г., что превышает отмеченные нами ранее значения (+22-+24 °С) [4]. Среднегодовые значения прозрачности воды варьировали от 43 см до 60 см, для гидрологического лета – от 48 см до 60 см. В 2018 г. отмечены наименьшие за период исследований значения прозрачности: 78 см – максимальная и 43 см – средняя. В 2020 г. отмечена максимальная прозрачность воды – 112 см и её значение не опускалось ниже 25 см. В 2015-17 гг., например, прозрачность воды в течение года в среднем составляла 41-52 см, а при летних и осенних «цветениях» фитопланктона понижалась до 10 см и менее [4]. В 2018 г. продолжительность ледового периода составила 3,5 месяца, в 2019 г. – менее двух месяцев, в 2021 г. – менее трёх месяцев, в 2020 г. залив не замерзал.

Время наступления и продолжительность гидрологических сезонов значительно варьировали. Весна наступала в первой декаде апреля в 2018 г., в третьей декаде января – в 2020 г., в среднем – в середине марта и длилась два месяца, один месяц – в 2018 г., 4 месяца – в 2020 г. Лето в среднем наступало в третьей декаде мая и длилось 4 месяца. Осень начиналась в конце сентября – начале октября (в 2019 г. – в середине сентября) и длилась в среднем два месяца. В 2015-2017 гг., например, осень заканчивалась вместе с календарным годом [4]. Согласно данным, полученным

на береговых гидрологических постах наблюдения в п. Нида и п. Открытое, переход температуры воды через $+15^{\circ}\text{C}$ в среднем происходит 26-30 мая и 12-14 сентября, т.е. лето длится 3,5 месяца [5]. За период наблюдений в среднем переход через $+15^{\circ}\text{C}$ летом происходил на 8 дней раньше, осенью – на 10 дней позже. Таким образом, показано увеличение продолжительности летнего сезона в исследуемом периоде.

В 2018 г. отмечено два выраженных «цветения» фитопланктона: непродолжительное в начале августа и продолжительное в середине октября, длившееся более недели, наряду с наименьшими за период наблюдений значениями прозрачности воды: 48 см – среднее для гидрологического лета и 5 см – минимальное для вегетационного периода. В 2019-21 гг. характерные летние и осенние «цветения» зафиксированы не были, несмотря на аналогичные средние и максимальные значения температуры воды, а также время наступления и продолжительность гидрологических сезонов. Ранее показана приуроченность «цветений» фитопланктона в Куршском заливе к годам с максимальным прогревом воды [6], но в 2020 г., несмотря на максимальную зафиксированную за период исследований температуру воды, выраженные «цветения» отмечены не были. Полученные сведения по прозрачности воды в летний период демонстрируют изменение средних показателей в сторону повышения, по сравнению 2015-17 гг. В 2019-21 гг. отмечены наибольшие за период исследований значения прозрачности воды, наряду с отсутствием выраженных «цветений» фитопланктона.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы ИО РАН FMWE-2021-0007 (Смирнова М.М.) и программы мониторинга НП «Куршская коса» (Рыльков О.В.).

Список литературы

- 1) Ланге Е.К. Фитопланктонный комплекс российской части Куршского залива (2001-2007 гг. // Известия КГТУ. – Калининград: КГТУ, 2013. № 28. – С. 87-94.
- 2) Ежова Е.Е., Ланге Е.К., Русских Я.В., Жаковская З.А., Чернова Е.Н. Вредоносные цветения микроводорослей в Куршском заливе Балтийского моря в 2008-2011 гг. // Проблемы изучения и охраны природного и культурного наследия национального парка "Куршская коса": сб. науч. ст. Калининград: Издательство БФУ им. И. Канта, 2012. Вып. 8. С. 81-95.
- 3) Рыбные ресурсы Куршского залива: характеристика, рациональное использование, пути повышения продуктивности. Калининград: Кн. изд-во, 1985. 238 с.
- 4) Смирнова М.М., Рыльков О.В. Некоторые гидрологические показатели и динамика «цветений» фитопланктона в литорали Куршского залива в районе музейного комплекса «Куршская коса» в 2015-2017 гг. // Проблемы изучения и охраны природного и культурного наследия национального парка "Куршская коса": сб. науч. ст. Калининград: Издательство БФУ им. И. Канта, 2018. Вып. 14. С. 115-126.
- 5) Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. / Под ред. Ф.С. Теризиева // Т. 1. Балтийское море. Вып. 3. Куршский и Вислинский заливы.– Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 72 с.
- 6) Александров С.В., Дмитриева О.А. Первичная продукция и показатели фитопланктона как критерии эвтрофирования Куршского залива Балтийского моря // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 1. С. 104-110.

МОРФОЛОГИЧЕСКОЕ И ГЕНЕТИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ
СВОБОДНОЖИВУЩЕЙ НЕМАТОДЫ *THERISTUS MELNIKOVITCHESUNOV*,
1986 (*XUALIDAE*) В МОРСКИХ ЛЬДАХ БЕЛОГО И КАРСКОГО МОРЕЙ

Тимченко А.И., Симакова У.В., Портнова Д.А.

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: молекулярно-филогенетический анализ, ледовые нематоды, Арктика.

Свободноживущие нематоды, населяющие межкристаллические пространства, заполненные рассолом в морских льдах, являются типичными представителями ледовой фауны [1]. В арктических морских льдах обитают 4 вида нематод: *Theristus melnikovi*, *Cryonema crassum*, *Cryonema tenue* и *Nieminema obliquorum*. Среди них *Theristus melnikovi* Tchesunov, 1986 является первым описанным видом, который был обнаружен в многолетних льдах Центрального Арктического бассейна [2]. Последующие находки ледовой нематоды *T. melnikovi* сообщались из сезонных припайных и дрейфующих льдов различных возрастов во многих районах Арктики, что указывает на широкое панарктическое распространение [1, 3]. Первые молекулярно-генетические данные ледовых нематод были получены для неидентифицированных видов, обнаруженных во льду фьордов Шпицбергена [3]. Данные о генетическом разнообразии морфологически идентифицированных ледовых нематод *T. melnikovi* до сих пор отсутствуют. В данной работе мы впервые представляем результаты интегративного подхода, молекулярно-генетического и морфологического, для оценки разнообразия и филогенетических отношений ледовой нематоды *T. melnikovi* из Белого и Карского морей.

Материалами для исследования послужили образцы морского льда, отобранные в ходе экспедиций АМК-76 (июль 2019 г.), АМК-83 (июнь 2021 г.) на НИС «Академик Мстислав Келдыш», а также в ходе прибрежной экспедиции в Ермолинской губе (Белое море) в декабре, феврале и апреле 2021 г. Всего было проанализировано 12 неполовозрелых особей: *T. melnikovi* из Белого (5 экз.) и Карского (7 экз.) морей. Для проверки достоверности различий видового состава из двух местообитаний использовался анализ сходства ANOSIM. Ординацию выполняли методом неметрического многомерного шкалирования (nMDS) с использованием меры сходства Брея-Кертиса. Также был использован метод SIMPER для оценки вклада морфометрических признаков в различия анализируемых видов. Статистическую обработку данных проводили с помощью программы PAST 4.08. Для молекулярно-генетического анализа были использованы ядерные маркеры малой и большой рибосомой субъединицы 18S и 28S. В анализ включались для сравнения публичные данные из базы NCBI GenBank. Выравнивание последовательностей проводили алгоритмом MAFFT в программе Geneious (версия 11.1.5). Филогенетическую реконструкцию проводили с помощью двух методов, баесовского и максимального правдоподобия, в программе MrBayes 3.2 и IQ-TREE. Гаплотипическая сеть построена по последовательностям 18S rDNA в программе PopART 1.7 методом TCS.

В Белом море, найденные особи соответствовали оригинальному и последующим описаниям *T. melnikovi* и были представлены всеми возрастными стадиями [2]. В Карском море (АМК-83) были обнаружены только неполовозрелые особи нематод. По литературным данным ледовые нематоды *T. melnikovi* являются единственным видом из рода *Theristus*, которые часто встречаются и проводят часть жизненного цикла в арктических льдах [1, 3]. Исходя из наших наблюдений, ранее особи *T. melnikovi* были обнаружены во льду Карского моря (АМК-76) и представлены всеми возрастными стадиями. Сравнив ледовых нематод на ювенильной стадии, собранных в АМК-83 с ледовыми особями нематод, определенных до уровня вида из АМК-76, была проведена идентификация, которая показала, что ювенили нематод, обнаруженные в дрейфующих льдах Карского моря (АМК-83), принадлежат к виду *T. melnikovi*.

Ординация, проведенная методом неметрического многомерного шкалирования, показала разделение всех особей *T. melnikovi* на две близкорасположенные группы: Карское и Белое моря. Два региона характеризуются сходством и частичным перекрытием эллипсов. Результаты анализа ANOSIM подтверждают наличие слабовыраженных различий ($R=0.35$, p (same)=0.0139). Наиболее значимыми морфологическими признаками являются: соотношение длины тела на длину хвоста (11.82 %), ширина стомы (10.52 %), длина хвоста (8.37 %). Стоит отметить, что различия морфологических признаков нематод на ювенильной стадии могут отражать изменения параметров в процессе онтогенеза [1].

В филогенетических деревьях, построенных по 18S rDNA, особи *T. melnikovi* из Белого и Карского морей образуют единую кладу с неидентифицированными особями *Xyalidae* sp. из льда фьордов Шпицбергена. Группа *T. melnikovi* с высоким уровнем поддержки является сестринской группой нематод *T. acer*, населяющие донные осадки. Для исследования особей *T. melnikovi* из трех регионов, была построена сеть гаплотипов. *T. melnikovi* характеризовался высоким разнообразием гаплотипов и имел географические различия в пределах исследуемой территории. Особи *T. melnikovi* образовали 4 гаплотипа: основной гаплотип широко распространен и включает в себя нематод из Белого, Карского морей и фьордов Шпицбергена (Валенберг-фьорд и Ван-Майен-фьорд); два гаплотипа из Белого моря, расстояние между гаплотипами составило от 2 до 6 замен; один гаплотип был представлен одним экземпляром из Валенберг-фьорда, отличающийся на 9 замен. Также были отмечены отличия по гену 28S rDNA между образцами из Белого и Карского морей. Анализ последовательностей выявил, что ледовые нематоды *T. melnikovi* из Белого моря более разнообразны внутри группы и отличаются от особей *T. melnikovi* из Карского моря. Анализ филогенетического дерева на основе 28S показал отдельные клады: 1 кладу *T. melnikovi* из Карского моря и 2 отдельные ветви, представленные *T. melnikovi* из Белого моря.

В работе показано, что генетические расстояния по ядерным генам между географическими удаленными популяциями *T. melnikovi* могут указывать на дивергенцию популяций с возможным образованием новых видов во льдах Белого моря. Однако, данные выводы требуют дальнейшего подтверждения, путем увеличения выборки и сравнения морфологических характеристик половозрелых особей из различных районов Арктики с последующим применением молекулярно-генетического анализа.

Часть исследования выполнена при финансовой поддержке Фонда поддержки молодых ученых имени Геннадия Комиссарова.

Список литературы

- 1) Чесунов А.В. Биология морских нематод. М.: Товарищество научных изданий КМК, 367 с. – 2006.
- 2) Чесунов А.В. Новая свободноживущая нематода, связанная с морским арктическим льдом. Зоол. журн. – 1986. – Т. 65, – №. 12. – С. 1782-1787.
- 3) Pitusi V. et al. The occurrence of Nematoda in coastal sea ice on Svalbard (European Arctic) determined with the 18S small subunit rRNA gene // Polar Biology. – 2021. – Т. 44. – №. 6. – С. 1153-1162.

ФАУНА СЕЗОННЫХ МОРСКИХ ЛЬДОВ В КАРСКОМ И ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЯХ

Тимченко А.И., Портнова Д.А.

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: криофауна, разнообразие, ледовая фауна, нематоды, Арктика.

Ежегодно в шельфовых морях российской Арктики образуются дрейфующие и припайный льды. Вследствие особенностей атмосферной циркуляции из Карского моря льды выносятся с шельфа через северную границу, включаются в крупномасштабную циркуляцию и служат источником льдов для северных районов Баренцева моря, а также центральных и западных районов Арктического бассейна [1]. В Восточно-Сибирском море, в осенне-зимний период лед образуется локально, а в летний период, наоборот, преобладает принос льдов из Арктического бассейна Северного Ледовитого океана [4].

Ледовые организмы населяют сеть каналов и капилляров, заполненных рассолом, в толще морских льдов, а также нижнюю поверхность льда. Считается, что колонизация льда возможна только теми животными, поперечное сечение тела которых не превышает возможный диаметр капилляров (250 мкм) [2]. Фауна морских льдов в Арктике чаще представлена разнообразными многоклеточными организмами, такими как коловратки, нематоды, копеподы, амфиподы, бескишечные турбеллярии, аннелиды и книдарии [5]. Ледовая биота хорошо исследована в припайных льдах Белого моря, моря Бофорта, моря Баффина и в районе архипелага Шпицберген [2, 5]. Тогда как состав и численность ледовых организмов дрейфующих сезонных и многолетних льдов в открытых районах арктических морей и в центральной Арктике изучены недостаточно [5], а криофауна Карского и Восточно-Сибирского морей остается до сих пор не исследована.

Целью данной работы являлось получение результатов о разнообразии и численности фауны сезонных льдов в Карском и Восточно-Сибирском морях.

Материал собран в ходе экспедиций на НИС «Академик Мстислав Келдыш» – в Карском море (АМК-76, 83) в июле 2019 г. и июне 2021 г., и в Восточно-Сибирском море (АМК-69) в сентябре 2017 г. Глубина составляла от 58 до 160 м. Пробы дрейфующих льдин отбирали возле кромки льда с борта судна с помощью сетей и ведра. Затем лед разделяли на части, перемещали в пластиковые емкости и растапливали в темном помещении при температуре +1...+4 °С. Во время таяния льда добавляли морскую воду, предварительно профильтрованную на сите с ячейей 25 мкм. После этого растаявший лед фильтровали на сите с ячейей 20–25 мкм и фиксировали DESS или 4 % формалином. Полученный материал просматривали под стереоскопическим микроскопом и производили количественный учет всех многоклеточных организмов. Вся фауна льда была классифицирована по таксонам высокого ранга, нематоды были определены до уровня рода и/или вида.

В Карском море было отмечено семь таксонов ледовой фауны высокого ранга. Самое высокое разнообразие ледовой фауны отмечалось в пробах льда, собранных в июне 2021 г. (АМК-83). Численность криофауны изменялась от 94 и до 9678 экз/м². Наиболее многочисленными были нематоды (Nematoda), на долю которых приходилось 57.9 % от всей ледовой фауны. Второй группой по численности были коловратки (Rotifera), они составляли 28.1 %. Во льду также были обнаружены науплии копепод, Harpacticoida, Calanoida, Cyclopoida, Amphipoda и Bivalvia. В целом состав ледовой фауны Карского моря был сходен с фауной однолетних льдов [5]. Было определено пять родов нематод: *Theristus*, *Cryonema*, *Daptonema*, *Amphimonhystrella*, *Chromadora*. Ледовые виды нематод, *Theristus melnikovi* и *Cryonema tenue*, были представлены самцом *T. melnikovi* и многочисленными неполовозрелыми особями обоих видов.

Во льдах Восточно-Сибирского моря фауна была представлена только нематодами. Всего было обнаружено 12 родов нематод: *Daptonema*, *Molgolaimus*, *Halalaimus*, *Paramonhystera*, *Trochamus*,

Amphimonhystera, *Linhomoeus*, *Endeolophos*, *Desmoscolex*, *Theristus*, *Cryonema*, *Hieminema*. Общая численность нематод во льду Восточно-Сибирского моря составила 1867.6 экз/м². Во льдах доминировали нематоды из рода *Daptonema* (53.4 %). Среди ледовых нематод было отмечено три вида, *T. melnikovi*, *C. tenue* и *Hieminema obliquorum*, представленные взрослыми и ювенильными стадиями. Ранее ледовая нематода *H. obliquorum* была описана и встречалась только во льдах Белого моря [4]. В этом исследовании мы впервые зарегистрировали *H. obliquorum* во льдах Восточно-Сибирского моря.

Таким образом, нематоды были доминирующим таксоном во всех исследуемых районах. Максимальное обилие и разнообразие криофауны отмечалось летом во льдах Карского моря, что, возможно, связано с цветением ледовой флоры в нижних слоях льда в исследуемый период; а также влиянием речного стока, о чем может свидетельствовать присутствие во льду эвригалинной фауны, особенно нематод и коловраток.

Однако состав сообщества нематод в Карском море беднее, чем во льдах Восточно-Сибирского моря. Такие различия могут быть связаны с сезонной изменчивостью ледовых сообществ и гидрологическим режимом вод. В осенне-зимний период конвективное перемешивание в Восточно-Сибирском море может проникать на глубины более 50 м и достигать дна. При интенсивном перемешивании всей толщи воды нематоды из осадка могут попадать в поверхностный слой и затем вмерзать в лед.

Авторы выражают благодарность руководителю программы М.В. Флинту за организацию экспедиций и возможность отбора морского льда на НИС «Академик Мстислав Келдыш». Мы также признательны В.И. Гагарину, Н.А. Беляеву, А.В. Мишину, И.В. Любимову за помощь при отборе ледовых проб.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-05-00128.

Список литературы

- 1) Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. 608 с.
- 2) Колосова Е.Г., Ильяш Л.В. Криофауна льдов пролива Великая Салма Кандалакшского залива Белого моря // Biological Resources of the White Sea and Inland Waters of European North. – 2009. – С. 285.
- 3) Чесунов А.В., Портнова Д.А. Свободноживущие нематоды в сезонном прибрежном льду Белого моря. Описание *Hieminema obliquorum* gen. et sp. n. (Nematoda, Monhysteroidea) // Зоологический журнал. – 2005. – Т. 84. – №. 8. – С. 899-914.
- 4) Юлин А.В., Шаратунова М.В., Павлова Е.А., Иванов В.В. Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря. Проблемы Арктики и Антарктики. 2018;64(3):229-240.
- 5) Bluhm B.A. et al. Sea ice meiofauna distribution on local to pan-Arctic scales // Ecology and evolution. – 2018. – Т. 8. – №. 4. – С. 2350-2364.

ИХТИОПЛАНКТОН ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКИ В ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД 2017 ГОДА

Тришкин А.В.¹, Казакова Д.М.¹, Ежова Е.Е.^{1,2}

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: иктиопланктон, Юго-Восточная Балтика.

К особенностям Балтийского моря можно отнести перманентный скачок плотности (пикноклин), формирующийся на границе раздела распресненных и соленых вод, который непреодолим для осенне-зимней конвекции, вследствие чего обычный конвективный механизм обогащения кислородом глубинных вод не работает. Соответственно, единственный источник аэрации придонного слоя - это эпизодические затоки насыщенных кислородом более соленых и плотных вод Северного моря, они же определяют большую изменчивость характеристик экосистемы Балтики [1].

2017 год для Балтийского моря характеризовался межгодовыми пиками численности икры восточно-балтийской трески и балтийского шпрота – наиболее многочисленных пелагофильных рыб. Во многом это было связано с интенсивностью притока североморских вод. С конца декабря 2014 г. по февраль 2016 г. в придонные слои Юго-Восточной Балтики проникли воды не менее трех (один большой и два умеренных) [1] североморских затоков, повысивших придонную соленость там до 14.4‰ и содержание придонного кислорода до 2,8 мл/л [2].

Рост численности икры шпрота был вызван расширением границ его нерестового биотопа, а также его расхождением с нерестовым биотопом донных рыб с уменьшением глубины локализации изогалины 11‰ [3].

Эта же величина параметра солености определяет репродуктивный объем вод для трески – слой с показателями содержания кислорода больше 2 мл/л и соленостью больше 11‰, которые важны для успешного оплодотворения икры и дальнейшего выживания икринок и личинок [4].

Таким образом, условия окружающей среды в 2017 г. способствовали успешному нересту пелагофильных рыб и выживаемости их икры и личинок в дальнейшем.

Показатель численности ранних онтогенетических стадий рассматривается как величина, позволяющая оценить объём нерестового запаса, а также как маркер, показывающий успешность размножения рыб в исследуемом районе [5].

По материалам экспедиционных работ представлено вертикальное распределение ихтиопланктона для различных участков исследуемого района в весенний период 2017 г. Целями данной работы являлись выявление закономерностей распределения и количественный учёт икры и личинок массовых пелагофильных видов рыб.

Для анализа вертикального распределения ихтиопланктона использовались результаты обработки зоопланктонных проб, отобранных в 135 рейсе НИС “Профессор Штокман” в период 03-06.04.2017 г. на 9 станциях с глубинами 78-107м, расположенных в глубоководных районах Юго-Восточной Балтики, в том числе в Гданьской и Готландской впадинах. Пробы отбирались сетью WP2 с размером ячеек 100 мкм путем облова слоев галоклин – поверхность, термоклин – поверхность и тотального лова (дно – поверхность) и фиксировались 40% формалином с доведением концентрации до 4%. Результаты анализа зоопланктонных проб представляли собой единственную возможность оценить вертикальное распределение ихтиопланктона для данного района и времени. Всего было обработано 27 проб.

Также в ходе экспедиции были получены вертикальные профили значений температуры, солёности и плотности воды с помощью использования мультипараметрических зондов Idronaut Ocean 316 и Sea & Sun Technology CTD 90M.

Выявлено преимущественное распространение в весеннем периоде личинок рыб в слое между галоклином и поверхностью. Сделан вывод о преимущественном распространении икры в слое под галоклином. Так, при облове слоев выше галоклина икра в пробах либо полностью отсутствует, либо ее количество незначительно, количество личинок всегда больше. При тотальном лове (дно – поверхность) количество икринок в пробах всегда превосходит количество личинок.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы ИО РАН FMWE-2021-0007.

Список литературы

- 1) Пака В.Т., Шука С.А., Ежова Е.Е., Полунина Ю.Ю., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кречик В.А., Чечко А.В. Экспедиционные исследования экосистемы Балтийского моря в 34-м и 36-м рейсах научно-исследовательского судна «Академик Николай Страхов» // Океанология, 2019, том 59, № 4, С. 691–694
- 2) Карасева Е.М., Ежова Е.Е. Современные изменения численности и индекса разнообразия ихтиопланктона открытой части Балтийского моря. // Труды IX Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)" Том I (III). 2020. С. 196-198
- 3) Карасева Е. М. О влиянии факторов среды на сроки начала и окончания массового нереста балтийского шпрота // Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов. V Балтийский морской форум. Всероссийская научная конференция. Труды. Калининград, Издательство Калининградского государственного технического университета, 2017. С. 273-276
- 4) Карасева Е.М., Ежова Е.Е., Кречик В.А. Влияние абиотических факторов среды на численность икры и личинок трески в юго-восточной Балтике в 2016 г. // ОКЕАНОЛОГИЯ, 2020, том 60, № 5, С. 729–739
- 5) Карасёва Е.М., Архипов А.Г., Ежова Е.Е. Ихтиопланктон Юго-Восточной Балтики в летний сезон: современные изменения в распределении и численности икры и личинок массовых видов рыб // Труды ВНИРО, 2020, том 181, С. 165-167

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВИРУСНЫХ ЧАСТИЦ В ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Уфимцева М.А., Муханов В.С.

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: вирусные частицы, вириопланктон, вертикальное распределение, численность, Черное море, проточная цитометрия, эпифлуоресцентная микроскопия.

Вирусы являются наиболее многочисленным компонентом биоты водных экосистем, их количество достигает 10^6 - 10^8 частиц/мл [1]. Как один из важнейших факторов смертности микроорганизмов [2], они играют ключевую роль в регулировании численности и разнообразия микробных сообществ Мирового океана, принимают активное участие в глобальных биогеохимических циклах, контролируют потоки вещества и энергии в морских экосистемах. Несмотря на постоянный рост количества исследований морского вириопланктона, черноморские вирусы практически не изучены, ничего не известно об их обилии и вертикальном распределении в глубоководной части Чёрного моря. В рамках данной работы ставилась задача восполнить этот пробел – получить первые для Чёрного моря данные по вириопланктону методами проточной цитометрии и эпифлуоресцентной микроскопии.

Материал был собран в 124 рейсе НИС "Профессор Водяницкий" в октябре 2022 г. на шельфе южнее Крымского полуострова и на разрезе от мыса Херсонес к центру западного круговорота. Пробы отбирали батометром на нескольких горизонтах от поверхности до придонного слоя (около 2000 м) с учетом данных СТД-зондирований о гидролого-гидрохимической структуре водного столба. Пробы морской воды фиксировали формалином (2%), после помещения в 5-мл криопробирки замораживали в нескольких повторностях в жидком азоте и хранились до их обработки в условиях стационарной лаборатории на берегу. После разморозки 1-мл аликвоту пробы фильтровали на мембрану с размером пор 0,02 мкм (Whatman Anodisc 25), окрашивали на капле SYBR Gold и отмывали в соответствии с [3]. Визуализацию вирусных частиц проводили методом эпифлуоресцентной микроскопии [4] с помощью микроскопа Jenalumar-a/d, оборудованного ртутной лампой НВО-202. Микрофотографии полей зрения обрабатывали в программе ImageJ (National Institutes of Health) для автоматического счета частиц. Перед проведением проточной цитометрии пробы разбавляли в 10 раз буфером ТЕ (10 мМ Трис-НСl, 1 мМ EDTA pH 8.0) и окрашивали красителем SYBR Green I при температуре $+80^{\circ}\text{C}$ в соответствии с [5]. Сравнение этих двух методов показало существенную недооценку численности вирусов с помощью проточной цитометрии, однако корреляция между результатами цитометрии и микроскопии была велика ($>0,7$), что позволило провести интеркалибровку этих методов для черноморских проб вириопланктона. Численность бактериопланктона также определяли методом проточной цитометрии [5].

В соответствии с полученными результатами, численность вириопланктона в Чёрном море менялась в диапазоне от 10^6 до 10^7 частиц/мл. Вертикальное распределение вирусных частиц оказалось неоднородным: в аэробной зоне их численность менялась в диапазоне от 0,74 до $9,36 \times 10^6$ частиц/мл и, в среднем, составляла $4,01 \pm 1,94 \times 10^6$ частиц/мл ($n = 44$, указано ст. откл.). На границе сероводородной зоны численность вириопланктона резко снижалась, и вплоть до максимальных глубин её значения изменялись в узком диапазоне (между $0,43$ и $1,62 \times 10^6$ частиц/мл, $n = 15$), а средняя величина ($0,97 \pm 0,34 \times 10^6$ частиц/мл) была достоверно ниже, чем в аэробном слое. С глубины около 800 м до придонного слоя наблюдали постепенное увеличение численности вирусов до 2×10^6 частиц/мл, причины которого пока не ясны.

Соотношение численностей вирусов и бактерий (VBR) менялось в достаточно широком диапазоне – от 3 до 90. Максимум и минимум были выявлены, соответственно, на глубинах около 20

м и 160 м. Характер вертикального распределения этого показателя был схожим – с высокими значениями в аэробном слое (35 ± 19), и низкими – в сероводородной зоне (13 ± 8).

Диапазоны изменения численности вириопланктона и величин VBR в глубоководной части Чёрного моря, а также их уменьшение с глубиной соответствовали наблюдениям в других акваториях Мирового океана. Вместе с тем, нам не удалось выявить сходства с вертикальной структурой вириопланктона Балтийского моря, в анаэробной зоне которого высокие численности вирусов (до 2×10^7 /мл) обусловлены исключительно низкими скоростями их разложения [6].

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 121040600178-6 и при финансовой поддержке РФФИ (№ 21-55-52001).

Список литературы

- 1) Suttle C.A. Viruses in the sea / C.A. Suttle // Nature. – 2005. – V. 437, № 7057. – P. 356–361.
- 2) Weitz J.S. Ocean viruses and their effects on microbial communities and biogeochemical cycles / J.S. Weitz, S.W. Wilhelm // F1000 Biol Rep. – 2012. – V. 8. № September. – P. 2–9.
- 3) Chen F., Lu J.R., Binder B., Hodson R.E. Enumeration of viruses in aquatic environments using SYBR Glod stain: application of digital image analysis and flow cytometer // Appl. Environ. Microbiol. – 2001. – Vol. 67 – P. 539 – 545.
- 4) Hara S. Abundance of Viruses in Marine Waters: Assessment by Epifluorescence and Transmission Electron Microscopy / S. Hara, K. Terauchi, I. Koike // Appl. Environ. Microbiol. – 1991. – V. 57, № 9. – P. 2731–2734.
- 5) Brussaard C.P.D. Quantification of aquatic viruses by flow cytometry / C. Brussaard, J.P. Payet, C. Winter, M. Weinbauer // Man. Aquat. viral Ecol. – 2010. – V. 11. № 2004. – P. 102–109.
- 6) Köstner N., Scharnreitner L., Jürgens K., Labrenz M., Herndl G.J., & Winter C. / High viral abundance as a consequence of low viral decay in the Baltic Sea redoxcline // PLoS One - 2017. - 12(6), e0178467.

ФИТОПЛАНКТОН ГОЛУБОЙ И ГЕЛЕНДЖИКСКОЙ БУХТ (Г.ГЕЛЕНДЖИК) В 2022 Г.

Федоров А.В., Бородулина П.А., Ключанцева А.П., Хоменко С.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Чёрное море, фитопланктон, Геленджикская бухта, численность, биомасса, доминирующий вид.

Фитопланктон северо-восточной части Черного моря характеризуется относительно стабильной последовательностью смены доминирующих видов и повторяющимися максимумами количественных характеристик в течение годового цикла [1]. Изменчивость динамики вертикальной термогалинной структуры вод может приводить к значимым перестройкам в сообществе фитопланктона. При этом количественные характеристики в большей степени зависят от поступления биогенных элементов в верхний деятельный слой, одним из основных источников которых являются реки. Голубая бухта (северо-западнее города Геленджик) подвергается воздействию стока реки, однако прямое влияние из-за высокой скорости обмена с прилежащими шельфовыми водами невелико. Геленджикская же бухта относительно закрыта для перемешивания, а небольшая глубина (в центре бухты около 10м) увеличивает суммарную облученность в слое воды. Крупных рек в неё не впадает, однако значительная антропогенная нагрузка, стоки малых ручьёв и ливневой канализации, а также выделение биогенных элементов из грунта при малой глубине могут способствовать эвтрофикации акватории. В связи с этим интересны отличия в динамике видовой структуры фитопланктона и количественных характеристик в двух близко расположенных, но сильно отличающихся по скорости обмена с шельфом акваторий.

В данной работе проведен анализ динамики видовой структуры и количественных характеристик фитопланктона в течение 2022 года в Геленджикской и Голубой бухтах, пространственной изменчивости фитопланктона в акватории Геленджикской бухты. В рейсах МНИС «Ашамба» отобраны пробы фитопланктона, хлорофилла *a* и гидрохимии в 5 точках в акватории Геленджикской бухты (створ, центр и 3 точки на малых глубинах) и в 1 точке в центре Голубой бухты (глубина 10м). Пробы фиксировали формалином, затем концентрировали осаждением и сливом надосадочной жидкости. Пробы объёмом 0,5 литра доводили до объёма 4-7 мл, затем производили подсчёт клеток на световом микроскопе с определением таксономического положения видов, замеряли размеры и рассчитывали объёмы клеток методом геометрического подобия фигур.

В 2022 году фитопланктон в районе исследования отличался относительно высокими биомассами (до 2 г/м³), а максимальная численность превышала 7 млн кл/л и достиг максимальных с 2017 года значений. Год характеризовался относительно большим количеством осадков и, соответственно, мощным речным стоком, трансформация которого после смешивания с водами открытого моря хорошо прослеживалась на спутниковых снимках. Неглубокий перемешанный слой с мая до конца августа благоприятствовал развитию цветения *Emiliana huxleyi*, которая в максимуме в июне достигала 7 млн кл/л на некоторых станциях и служила маркером распространения обогащенных стоком вод. С июля по конец августа численность постепенно снижалась, а в конце августа резко упала, что сопровождалось увеличением прозрачности.

Геленджикская бухта выделялась значительно более высокой биомассой в весенний период, наибольшие значения в году показывала в июне – начале июля кокколитофорида, в июле же начинает преобладать диатомовая *Pseudosolenia calcar-avis*, которая на некоторых станциях показывала до 2-х г/м³. Заметны отличия количественных характеристик и вклада диатомовых, динофлагеллят и прочих Геленджикской бухты от Голубой и от открытого моря. Так, в апреле суммарная биомасса в Геленджикской бухте (станция 6) более чем в 3 раза выше, чем в Голубой.

Видовой состав диатомовых в мае включал *Pseudonitzschia spp.*, *Chaetoceros spp.*, *Cylindrotheca closterium*.

В Геленджикской бухте в весенний период в разы выше численность и биомасса, чем в Голубой бухте. Летом концентрация фитопланктона примерно одинакова. В конце лета в Геленджикской бухте в первую очередь было значительно меньше кокколитофорид, больше динофлагеллят и мелких жгутиковых. Динофлагелляты показывали максимумы биомассы в конце весны и начале лета. В мелководных частях бухты при слабом перемешивании и высокой антропогенной нагрузке несут риск токсичных цветений, «красных приливов». Всего в 2022 году в районе исследования обнаружено 123 вида и ещё 27 определены до рода и выше в таксономической иерархии.

Данное исследование было выполнено при финансовой поддержке Министерства Науки и Высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2021-946 от 28.09.2021.

Список литературы

- 1) Mikaelyan A.S., Kubryakov A.A., Silkin V.A., Pautova L.A., Chasovnikov V.K. Regional climate and patterns of phytoplankton annual succession in the open waters of the Black Sea // Deep Sea Research Part I. 2018. V 142. P. 44-57 DOI: 10.1016/j.dsr.2018.08.001

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ДОМИНИРУЮЩЕГО ВИДА *THALASSIOSIRA TENERA* (BACILLARIOPHYTA) В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Шульгина М.А.¹, Шевченко О.Г.^{1,2}

¹Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

²Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: диатомовые водоросли, *Thalassiosira*, морфология, сезонная динамика.

Виды рода *Thalassiosira* широко распространены во всех климатических зонах Мирового океана, вызывают «цветения» воды в умеренных и полярных широтах, в том числе вредоносные для гидробионтов [1, 2]. В результате изучения годовой динамики фитопланктона с применением сканирующей электронной микроскопии впервые получены сведения о сезонной динамике *Thalassiosira tenera*, доминирующего в планктоне северо-западной части Японского моря. Вид круглогодично присутствовал в планктоне, численность варьировала от 579 кл./л в декабре, до 7281 кл./л в январе. *Thalassiosira tenera* доминировал по численности в сообществе в районе исследования с конца ноября по конец января. Представлено расширенное диагностическое описание *T. tenera* на основе культурального материала. Исследованы особенности развития вида в лабораторной культуре, показана вариативность морфологии панциря на разных стадиях развития.

Сбор материала проводили в период 2018-2020 гг. на станциях в б. Парис (43°00'44" с.ш., 131°54'45" в.д.) и Спортивной гавани (43°07'00" с.ш., 131°52'29.6" в.д.), залив Петра Великого, Японское море. Фитопланктон отбирали 5-ти литровым батометром Нискина с поверхностного горизонта 2 раза в месяц круглогодично. Для получения клоновых культур клетки *Thalassiosira* изолировали с помощью стеклянной пипетки из не фиксированной пробы воды. Каждую клетку отмывали 5–7 раз в стерильной морской воде, затем помещали в лунку 96-луночного планшета, предварительно заполненную 200 мл питательной среды f/2. Планшеты помещали в климатическую камеру при температуре 20±2°C, освещенности 3500 лк и свето-темновым периодом 12 ч свет:12 ч темнота [3]. Культуральные клоны *T. tenera* размещены на хранение в ресурсной коллекции Центра коллективного пользования «Морской биобанк». Полевые пробы фитопланктона и клоны *T. tenera* исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа Zeiss Sigma 300 (СЭМ). Препараты для СЭМ готовили посредством обезвоживания в этиловом спирте при разных разведениях [4]. СЭМ исследования были проведены в Центре коллективного пользования "Дальневосточный центр электронной микроскопии" ННЦМБ ДВО РАН.

На основании изучения строения клеток из природных популяций, а также культуральных клонов *T. tenera* с использованием световой и сканирующей электронной микроскопии составлено детальное диагностическое описание. Исследование морфологии *T. tenera* в культуре показало, что на протяжении жизненного цикла для вида характерна изменчивость основных диагностических признаков; наблюдали изменение строения поверхности створки, величины и формы двугубого выроста, изменение ареоляции створки. В накопительной культуре рост *T. tenera* характеризовался типичной S-образной кривой. Лаг-фаза короткая, не более 3 суток. Суспензия в этот период представлена одиночными клетками, редко короткими колониями из 2 клеток. Створки клеток на всей поверхности покрыты многочисленными пористыми выростами. Край створки с дугообразными возвышениями, покрывающими краевые и двугубый выросты.

На 3-е сутки развития культуры зарегистрирована максимальная скорость роста (2.5 деления в сутки). Продолжительность экспоненциальной фазы 6 суток. В конце экспоненциальной фазы в культуре наблюдали колонии и одиночные клетки, створки которых были гладкими. Уменьшилось число клеток, покрытых кремнеземным слоем. Наблюдали многочисленные створки с единичными

пористыми кремнеземными выростами, дугообразные возвышения присутствовали не над каждым краевым выростом.

На 15-е сутки скорость роста составляла 0.3 деления в сутки, и популяция переходила в стационарную стадию, которая продолжалась 4 суток. На протяжении стационарной стадии у большинства клеток в культуре кремнеземный слой отсутствовал, на створках стали отчетливо видны краевые выросты, форма двугубого выроста варьировала от низкой до высокой трубки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-04-00752. Исследования проведены на площадке ЦКП "Приморский океанариум".

Список литературы

- 1) Hasle G.R., Syvertsen E.E. Marine diatoms / In: Identifying marine phytoplankton (Ed. by C.R. Tomas), Academic Press, San Diego, California, 1997. P. 5–385.
- 2) Ianora A., Miralto A., Poulet S. A., Carotenuto Y., Buttino I., Romano G., Casotti R., Pohnert G., Wichard T., Colucci-D'amato L., Terrazzano G., Smetacek V. Aldehyde suppression of copepod recruitment in blooms of a ubiquitous planktonic diatom // Nature. 2004. Vol. 429. P. 403–407.
- 3) Andersen R.A. Algal culturing techniques. Elsevier Academic Press, London, UK, 2005. 578 p.
- 4) Truby E.W. Preparation of single-celled marine dinoflagellates for electron microscopy // Microscopy Research and Technique. 1997. Vol. 36. P. 337–340.

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗОН
ФОКУСИРОВАННОЙ ФЛЮИДРАЗГРУЗКИ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Богданов А.А.¹, Видищева О.Н.¹, Большакова М.А.¹, Рязанцева К.Ю.¹, Немченко Н.В.¹,
Ахманов Г.Г.¹, Соловьева М.А.^{1,2}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²ООО «Деко-Геофизика», г. Москва

Ключевые слова: донные отложения, озеро Байкал, рассеянное органическое вещество (РОВ), молекулярные маркеры.

Байкал представляет собой рифтовый нефтегазоносный бассейн. Осадочный чехол Байкальской впадины характеризуется активной углеводородной системой. Методы поверхностных геохимических поисков дают возможность изучать элементы и процессы байкальской углеводородной системы.

Ведущий инструмент изучения ОВ осадков – газохроматографический – масс-спектрометрический метод (ГХ-МС). Углеводородные (УВ) молекулярные маркеры или биомаркеры являются индикаторами, распределение которых дает информацию о природе РОВ, его источниках, степени катагенетического преобразования. Метод биомаркерного анализа позволяет наиболее точно определить присутствие в донных отложениях эпигенетического (миграционного) РОВ и уверенно отличить его от современного (сингенетического) ОВ.

В период с 23 июня по 07 июля 2022 года на озере Байкал проходила экспедиция научно-образовательного проекта Class@Baikal. В рамках рейса исследовались новые и изученные ранее структуры. В данной работе представлены результаты исследований трех структур: сип «Р-3», сип «Голый» и гидратоносная структура «МГУ».

Цель работы заключается в идентификации эпигенетического РОВ донных отложений в изучаемых структурах - зонах фокусированной разгрузки УВ. Задачи работы состоят в: 1) интерпретации результатов ГХ-МС метода; 2) подсчете биомаркерных коэффициентов и определении природы и степени преобразования РОВ; 3) разграничении эпигенетического и сингенетического ОВ осадков, определении структур, содержащих преобразованное РОВ.

Отбор донных осадков осуществлялся с помощью гравитационной трубы 5 м, весом 600 кг. Аналитическая процедура изучения РОВ включала: выделение хлороформенных битумоидов из осадков методом экстракции, определение их группового состава, разделение на фракции насыщенных и ароматических УВ, ГХ-МС анализ насыщенной и ароматической фракции УВ на газовом хроматографе Agilent 8890 5977B GS/MSD с масс-селективным детектором.

Структура «Р-3» расположена на склоне авандельты реки Селенга. Из структуры была отобрана колонка осадков длиной 267 см, в которой были обнаружены каналы миграции флюидов и отложения, напоминающие грязевулканическую брекчию «байкальского типа», в связи с чем выдвинуто предположение, о грязевулканическом происхождении структуры.

Из колонки донных отложений было отобрано 4 образца осадка на исследования РОВ методом ГХ-МС. Распределение n-алканов ($m/z - 57$) бимодальное с максимумами в $C_{17}-C_{20}$ и $C_{27}-C_{31}$. Высокомолекулярные гомологи ($C_{24}-C_{35}$) имеют «пилообразное» распределение, свойственное современному ОВ, низкомолекулярные ($C_{15}-C_{23}$) имеют типичное «нефтяное» распределение. Значения индекса нечетности $SPIC_{12}-C_{24}$ (~ 1) несвойственные сингенетическому ОВ. Средние значения индексов зрелости (приведены в квадратных скобках):

по регулярным стеранам ($m/z - 217/218$) - $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)-C_{29}$ [0,53] и $20S/(20S + 20R)-C_{29}$ [0,41];
по терпанам ($m/z - 191$) - Ts/Tm [0,59] и $22S/(22S + 22R) - C_{32}$ [0,54];

по ароматическим УВ ($m/z - 198, 231$) – (4-MDBT/1-MDBT) [0,52], TA21+22/TA27-29 [0,7]. Коэффициенты зрелости отвечают зрелому ОБ стадии МК₂.

Сип «Голый» представляет собой поднятие высотой 50 м и шириной 1 км. В бортовой части структуры был зафиксирован газовый факел высотой 230 м. Из центральной и бортовой части структуры были отобраны колонки донных отложений длиной 480 и 439 см соответственно. В колонке осадков обильно встречались текстуры выхода газов, в «бортовой» станции были обнаружены газовые гидраты.

Из колонок донных отложений бортовой и центральной областей сипа было отобрано соответственно 2 и 3 образца осадков на исследования РОВ методом ГХ-МС. Распределение *n*-алканов бимодальное с преобладанием высокомолекулярных гомологов (C₂₄-C₃₅), для которых характерно «незрелое» распределение, для низкомолекулярных (C₁₅-C₂₃) – «зрелое». Индекс нечетности $SPIC_{12-C_{24}}$ близится к 1. Индексы термической зрелости фракций насыщенных и ароматических УВ отвечают эпигенетичному, преобразованному ОБ пика нефтяного окна (стадия МК₂). Средние значения коэффициентов (приведены в квадратных скобках; бортовая / центральная часть):

для регулярных стеранов ($m/z - 217/218$) - $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ -C₂₉ [0,52/0,54] и 20S/(20S + 20R)-C₂₉ [0,39/0,4];

по терпанам ($m/z - 191$) - Ts/Tm [0,56/0,7] и 22S/(22S + 22R) - C₃₂ [0,52/0,55];

по ароматическим УВ ($m/z - 198, 231$) – (4-MDBT/1-MDBT) [0,53/0,53], TA21+22/TA27-29 [0,7/0,7].

Структура «МГУ» представляет собой многовершинную возвышенность, расположенную на разломе «Гидратный», который контролирует зоны разгрузки углеводородных газов смешанной природы (биогенных и термогенных) на поверхность дна [1]. ГХ-МС методом исследовались экстракты из осадков станции, отобранной из вершины на поднятом блоке структуры. В колонке донных отложений отмечаются каналы миграции флюидов и текстуры дегазации. Несмотря на вышеперечисленные признаки флюидоразгрузки, в осадках станции не зафиксировано наличие зрелого ОБ. Распределение *n*-алканов «пилообразное», $SPIC_{12-C_{24}} \sim 4,6$. Индексы зрелости принимают значения характерные для незрелого ОБ (приведены в квадратных скобках):

для регулярных стеранов ($m/z - 217/218$) - $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ -C₂₉ [0,43] и 20S/(20S + 20R)-C₂₉ [0,34];

по терпанам ($m/z - 191$) - Ts/Tm [0,18] и 22S/(22S + 22R) - C₃₂ [0,53] - выбивается;

по ароматическим УВ ($m/z - 198, 231$) – (4-MDBT/1-MDBT) [0,39] - выбивается, TA21+22/TA27-29 [0,1]. Тем не менее два значения выбиваются и отвечают стадии МК₁.

Таким образом, биомаркерный анализ экстрактов РОВ показал, что в области структур «Р-3» и «Голый» фиксируется зрелое (миграционное) ОБ. Интересно, что в пределах структуры «МГУ», где разгружаются термогенные газовые УВ, ГХ-МС метод показал фоновые значения, характерные для преобладания незрелого сингенетичного ОБ в донных отложениях.

Список литературы

- 1) Видищева О.Н., Ахманов Г.Г., Соловьева М.А., Мащенин А., Хлыстов О.М., Егошина Е.Д., Кудаев А.А., Корост Д.В., Полудеткина Е.Н., Морозов Н.В., Григорьев К.А. Особенности разгрузки углеводородных газов вдоль разлома Гидратный (озеро Байкал). Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, 3 (2021), стр.3-16.

РОЛЬ ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛОВ В СОХРАНЕНИИ И ПРЕОБРАЗОВАНИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В МОРЯХ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ

Гершелис Е.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Ключевые слова: донные осадки, органический углерод, глинистые минералы, арктические моря.

Органический углерод (ОУ), высвобождаемый из наземных многолетнемерзлых толщ и переносимый в воды арктических морей, играет важнейшую роль в формировании современного баланса углерода в планетарном масштабе. Целью данной работы явилась оценка глинистых минералов как одного из факторов, контролирующих степень сохранности ОУ в донных осадках моря Лаптевых (МЛ) и Восточно-Сибирского моря (ВСМ).

Объектом исследования стали четыре коротких керна (до 20 см), отобранных в различных районах акваторий Восточной Арктики – прибрежной и центральной частях МЛ, в западной части пролива Дмитрия Лаптева и в восточной части ВСМ (близ Чаунской губы). Макромолекулярный состав органического вещества (ОВ) определялся методом пиролизической газовой хромато-масс-спектрометрии (пир-ГХ-МС) в соответствии с подходом, изложенным в [1]. Гранулометрический состав осадков был определён методом лазерной дифракции. Состав глинистых минералов был установлен с помощью рентгенодифракционного анализа. Перед проведением анализов пробы были предварительно лиофилизированы и гомогенизированы.

Традиционно, глинистые минералы используются как индикатор источника обломочного материала в морских осадках, однако в представленном исследовании они были проанализированы совместно с различными группами органических соединений (фенолы, алкилбензолы, пиридины, ароматические соединения (нафталин и инден), фурфуролы) для установления возможных взаимосвязей. Указанные макромолекулярные группы представляют различные классы соединений, которые, в свою очередь, связаны со специфическими наземными или морскими источниками ОУ. Сумма площадей пиков отдельных соединений - индикаторов групп для отдельного образца - принималась за 100%, и далее рассчитывалась относительная доля каждого соединения [1]. Отметим, что метод пир-ГХ-МС дает представление об относительных концентрациях соединений в осадках и, таким образом, может быть использован для оценки и сравнения композиции ОВ лишь применительно к исследуемым объектам.

В распределении макромолекулярных групп значительно выражена пространственная изменчивость. В западной части района исследования (МЛ и пролив Дмитрия Лаптева) в прибрежных отложениях преобладают фенолы (до 53%), в отличие от более глубоководных отложений МЛ, богатых фурфуролами (до 51%) и пиридинами (до 33%). Наиболее высокое содержание ароматических соединений наблюдается в осадках кернов, отобранных в проливе Дмитрия Лаптева (до 20%) и ВСМ (до 17%). В восточной части ВСМ характерны более низкие концентрации фенолов (до 37%) и более высокая доля пиридина (до 24%) по сравнению с прибрежными кернами западной части (до 16%). Эти региональные различия в составе могут отражать более значительный вклад наземной растительности в западной части акватории по сравнению с восточной частью ВСМ, которая характеризуется как ограниченным речным стоком, так и прямым влиянием тихоокеанских вод [2].

Статистический анализ также позволяет сделать о связи содержания ароматических соединений и алкилбензолов с каолинитом ($r=0.592$ и 0.465 , соответственно, $p<0.05$), тогда как фурфуролы имеют слабую положительную связь со смектитом ($r=0.374$, $p<0.05$) и отрицательную - с каолинитом ($r=-0.492$, $p<0.05$). Для фенолов характерна отрицательная корреляция со смектитом ($r=-0.413$, $p<0.05$). Более того, отмечается сильная отрицательная корреляция между долей

ароматических соединений и содержанием фуруролов ($r=-0.671$, $p<0.05$), что может указывать на конкурирующие механизмы минералогического контроля (сорбция на поверхностях различных минералов, степень влияния гидродинамической сортировки и др.) [1,3]. Ароматические соединения и алкилбензолы (имеющих также ароматическую структуру) демонстрируют хорошую корреляцию ($r=0.712$, $p<0.05$), поэтому источник этих соединений и их механизмы защиты, вероятно, идентичны.

Приведенные тезисы подтверждаются анализом взаимосвязей содержания перечисленных молекулярных групп и доли пелитового материала в осадках. Так, отрицательная корреляционная связь с долей пелита ярко выражена у алкилбензолов ($r=-0.589$, $p<0.05$), ароматических соединений ($r=-0.575$, $p<0.05$) и фенолов ($r=-0.722$, $p<0.05$), тогда как фуруролы характеризуются сильной положительной связью с пелитовыми частицами ($r=0.845$, $p<0.05$). Ранее было показано, что лигнин (предположительно исходный материал для образования фенолов) переносится преимущественно в форме детрита или с крупнозернистыми осадками и осаждается в основном в мелководной части шельфа, что объясняет отрицательную связь с долей пелита.

Установлено, что смектиты в целом обладают более высокой сорбционной способностью, чем каолиниты, вследствие совокупности факторов таких как более высокий заряд, большая площадь поверхности и, вероятно, более высокое содержание железа. Особенно сильная связь обнаружена между смектитами и компонентами соединений бактериальной клеточной поверхности, такими как полисахариды [4]. Последний тезис нашел подтверждение в наших результатах (фуруролы - производные полисахаридов).

Таким образом, в исследованных осадках наибольшую потенциальную сохранность биодоступного ОУ в минеральной матрице обеспечивает смектит, тогда как каолинит концентрирует на своей поверхности малолабильное и преимущественно аллохтонное ОВ. Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейшего изучения глинистых минералов как одного из ключевых агентов сохранения ОУ в условиях активной ремобилизации углерода из многолетнемерзлых толщ на шельфе Восточной Арктики.

Исследования выполнены при поддержке РНФ (проект №21-77-00075).

Список литературы

- 1) Sparkes, R.B., Selver, A.D., Gustafsson, Ö., Semiletov, I.P., Haghypour, N., Wacker, L., Eglinton, T.I., Talbot, H.M., Van Dongen, B.E., 2016. Macromolecular composition of terrestrial and marine organic matter in sediments across the East Siberian Arctic Shelf. *Cryosphere*. doi:10.5194/tc-10-2485-2016
- 2) Semiletov I., Dudarev O., Luchin, V., Charkin, A., Shin, K.-H., Tanaka, N. The East Siberian Sea as a transition zone between Pacific-derived waters and Arctic shelf waters // *Geophysical Research Letters*. 2005. №32. L10614
- 3) Tesi, T., Semiletov, I., Dudarev, O., Andersson, A., Gustafsson, Ö., 2016. Matrix association effects on hydrodynamic sorting and degradation of terrestrial organic matter during cross-shelf transport in the Laptev and East Siberian shelf seas. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. doi:10.1002/2015JG003067
- 4) Dontsova K. M., Bigham J. M. Anionic polysaccharide sorption by clay minerals // *Soil Science Society of America Journal*. №69(4).2005. P. 1026-1035.

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ ПО РАДИОНУКЛИДАМ

Кременчуцкий Д.А., Гуров К.И.

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: Черное море, Керченский пролив, донные отложения, гранулометрический состав, органический углерод, цезий-137, калий-40, свинец-210, радий-226, скорость осадконакопления.

Керченский пролив – важный транспортный, промысловый, а также туристический узел. Активизация хозяйственной и промышленной деятельности в акватории Керченского пролива и на его берегах в начале XXI века привела к ухудшению качества вод и, в целом, состояния экосистемы пролива, что не могло не отразиться на его социально-экономической привлекательности. Кроме того, дальнейшее постоянное увеличение антропогенного пресса на морскую среду может привести к формированию зон экологического риска в экосистеме Керченского пролива [1].

В отличие от водной толщи, характеристики которой подвергаются значительной пространственной и временной изменчивости, донные отложения считаются средой консервативной. Донные отложения накапливают информацию об экологическом состоянии исследуемой акватории на протяжении существования водного объекта, что позволяет проследить интенсивность антропогенной нагрузки на экосистему, изменяющуюся по времени, а также исследовать протекание естественных процессов.

В Керченском проливе основными источниками поступления материала являются воды Азовского моря, абразионные берега Керченского и Таманского п-овов и антропогенная деятельность [2].

Скорости осадконакопления в отдельных частях пролива и предпроливной зоне значительно отличаются. Это определяется особенностями орографии берега и рельефа дна в центральной части пролива и в мелководном Таманском заливе, а также локальной системой течений в проливе и предпроливной части со стороны Черного моря. После сооружения Тузлинской дамбы на различных участках Керченского пролива зоны активной динамики донных отложений сменились участками активного заиления [3].

Цель работы – получить количественные характеристики пространственной и вертикальной изменчивости концентрации ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{40}K и ^{226}Ra в пробах донных отложениях Керченского пролива, оценить скорость осадконакопления и взаимосвязь распределения радионуклидов с геохимическими характеристиками отложений.

Отбор проб колонок проводился с помощью акриловой грунтовой трубки с внутренним диаметром 60 мм и вакуумным затвором. В лаборатории колонки разделяли на слои толщиной 1–2 см с помощью ручного экструдера и кольца из акрила.

Измерения активности ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{40}K и ^{226}Ra в пробах донных осадков проводились на низкофоновом гамма-спектрометре со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) колодезного типа. Калибровка эффективности регистрации гамма-квантов с различной энергией была выполнена с использованием сертифицированных источников, поставляемых МАГАТЭ (IAEA-326, IAEA-CU-2006-03), которые имеют форму и размеры, аналогичные исследованным нами образцам. Погрешность определения активности радионуклидов была обусловлена статистической погрешностью их счета в препарате (1σ) с учетом статической погрешности счета фона и калибровки эффективности и не превышала 15%.

Гранулометрический состав донных отложений определяли комбинированным методом декантации и рассеивания. Содержание органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$) определяли кулонометрически

на экспресс-анализаторе – АН 7529 по методике, адаптированной для морских донных отложений [4].

Установлено, что донные отложения Керченского пролива представлены преимущественно пелито-алевритовыми илами с включениями песчаного материала и ракушечного детрита вблизи берега. Содержание $C_{\text{орг}}$ изменяется от 0,2% сух. масс. в отложениях юго-западной части Керченского пролива до 2,8% сух. масс. в отложениях Таманского залива со средним значением 1,3% ($n = 14$). Полученные данные вертикального распределения содержания $C_{\text{орг}}$ указывают на наличие тенденции к снижению его концентрации с глубиной.

Анализ полученных результатов показал, что пространственное распределение исследуемых радионуклидов в поверхностном слое донных отложений Керченского пролива неоднородно. Максимальные концентрации отмечены для мелкозернистых отложений юго-восточной части пролива и в Таманском заливе, а минимальные для центральной и северо-западной частей пролива. Такое пространственное распределение концентрации радионуклидов может быть обусловлено особенностями циркуляции вод в проливе, а также изменчивостью в поле концентрации взвешенного вещества. Отмечалась тенденция к росту величин концентрации радионуклидов с глубиной.

Установлена высокая статистически значимая корреляционная зависимость между распределением концентрации радионуклидов и содержанием $C_{\text{орг}}$, а также долей илистой фракции.

Пробы донных отложений и данные об их геохимических характеристиках были получены в рамках темы государственного задания FNNN-2021-0005. Данные по активности радионуклидов были получены в рамках темы государственного задания FNNN-2021-0004. Анализ полученных данных был выполнен в рамках проекта РФФ № 22-77-10056.

Список литературы

- 1) Формирование зон экологического риска в прибрежных акваториях Керченского пролива / К.И. Гуров [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 6. С. 637–654.
- 2) Динамика основных гидрохимических характеристик качества вод Керченского пролива в современных условиях / С.С. Жугайло [и др.] // Труды Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. 2011. Т. 49. С. 137–146.
- 3) Ломакин П.Д., Панов Б.Н., Спиридонова Е.О. Современные особенности трансформации донных отложений в Керченской бухте и прилегающей к ней акватории Керченского пролива // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2013. № 4. С. 102–111.
- 4) Люцарев С.В. Определение органического углерода в морских донных отложениях методом сухого сжигания // Океанология. 1986. Т. XXVI, вып. 4. С. 704–708.

ПИРИТ И ЕГО РОЛЬ В ДЕГАЗАЦИИ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНОВ НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЮЖНО-КИТАЙСКОГО МОРЯ

Калгин В.Ю.¹, Обжиров А.И.², Еськова А.И.², Легкодимов А.А.²

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: Пирит, Южно-Китайское море, микробиология, метан, аутигенная минерализация.

Южно-Китайское море находится на пересечении Евразийской, Тихоокеанской и Индо-Австралийской плит. Это одно из крупнейших морей пассивной континентальной окраины. Полученные исследования уникальны и несут понимания геолого-географических, океанографических, геохимических и микробиологических процессов, происходящих в акватории. Цель: изучить распределение сульфидных агрегатов в нефтегазоносных бассейнах Южно-Китайского моря. На данный момент этот регион является перспективным для поисково-оценочных работ георесурсов, а именно углеводородного сырья. В процессе формирования месторождения углеводородных веществ образуются ореол рассеяния сероводорода и формируются эпигенетические сульфиды. Данные получены в ходе 88-го рейса российско-вьетнамской геолого-геофизической экспедиции на НИС Академик М.А. Лаврентьев с 25 октября по 8 декабря 2019 года в Южно-Китайском море. В западной части Южно-Китайского моря в осадочных бассейнах Нам Кон Сон, Фу Хань и в бассейне Красной реки были проведены работы [1]. Глубина станций достигала 2500 м, длина полученных образцов колонок достигала 6 м. Отбор проб осуществлялся путем неглубокого бурения с использованием гравитационного пробоотборника из нержавеющей стали. В ходе этой работы были отобраны пробы из 55 скважин [2]. Для анализов использовалась сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) отдела электронной микроскопии Национального научного центра морской биологии имени А. Жильмунского Российской академии наук (представитель Д.В. Фомин) для визуализации агрегатов сульфидов. Использовался сканирующий электронный микроскоп Sigma 300 VP Carl Zeiss AG. Определение минерального состава и топографическая съемка проводились в лаборатории рентгеновских методов Приморского регионального центра элементного и изотопного анализа ДВО РАН под руководством к.г.-м.н. А.А. Карабцова. Работа проводилась на дифрактометре MiniFlex II (XRD) и микротомографе SKYSCAN 1272. Содержание метана определялось с помощью газового хроматографа «Кристаллюкс-4000М». Индикаторные микроорганизмы выделялись анализом 16S рДНК и функциональных генов методом ПЦ-реал тайм. Данные микротомографической съемки указывают на то, что сульфидная минерализация в виде трубчатых нитей образует капиллярную систему, пронизывающую донные отложения. Индикаторные группы микроорганизмов, ответственных за окисление метана (углерод-окисляющие бактерии, метанотрофы и сульфатредуцирующие бактерии), были выделены на участках с сульфидными трубчатыми стяжениями и аномальными концентрациями метана. Наблюдаемая по колонке корреляция, между численностью микроорганизмов и изменением концентрации метана в керне, связана и с образованной аутигенной минерализацией, отражающей поток газов в нефтегазоносных осадочных бассейнах. Образование сульфидов связано с анаэробным окислением метана под действием сульфатов и сульфатного восстановления [3], что отражается в образовании пиритовых стяжений в зоне сульфатно-метанового перехода и по всей длине восстановленного слоя керна. В связи с этим морфологические характеристики указывают влияние газов мантийных и углеводородных источников совместно с сульфат-редуцентами. Полученные данные являются основанием для новых оценок эндогенных газово-флюидных проявлений в западной привьетнамской части Южно-Китайского моря. Применения комплексно минералогических, газогеохимических

и геомикробиологических индикаторов для прогноза перспектив нефтегазоносности осадочных бассейнов Южно-Китайского моря хорошо зарекомендовали себя и подтвердили наличие существующего потенциала на углеводороды.

Экспедиция и анализ образцов проводились в рамках госбюджетной темы 121021500055-0 Министерства образования и науки РФ, а обобщение материалов поддержано Российским научным фондом (проект № 19-17-00234-П).

Список литературы

- 1) Геолого-геофизические и океанографические исследования западной части Южно-Китайского моря и прилегающего континента (по результатам 88 рейса НИС «Академик М.А. Лаврентьев» и береговых экспедиций 2010-2020). М.: ГЕОС. 2021. 550 с.
- 2) Аршев Е.Г., Гаврилов В.П., Донг Ч.Л. Геология и нефтегазоносность фундамента Зондского шельфа. М.: изд-во «Нефть и газ», 1997. 285 с.
- 3) Астахова Н.В. Аутигенные образования в позднекайнозойских отложениях окраинных морей Востока Азии. Владивосток: Дальнаука, 2007. 244 с.

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ФЛЮИДОВ ДОННЫХ ОСАДКОВ ПРОГИБА УЕДИНЕНИЯ, СЕВЕРО-КАРСКИЙ БАССЕЙН

Киль А.О.¹, Полудеткина Е.Н.², Юмашева А.К.³, Басова Е.Д.², Кирсанова А.А.²

¹ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга», г. Санкт-Петербург

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

³Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, г. Москва

Ключевые слова: Карское море, газообразные углеводороды, флюидоразгрузка, покмарки.

Одной из ключевых задач экспедиции ТТН-21 по программе «Обучение-через-исследование (Плавающий Университет)», проходившей в СВ части Карского моря в 2022 году, являлось проведение литолого-геохимических исследований четвертичных донных осадков с целью выделения зон глубинной разгрузки углеводородных газов на поверхность морского дна. Одним из участков исследований являлся полигон, расположенный на границе Центрально-Карского желоба и Центрально-Карской возвышенности. Четвертичный разрез участка сложен позднеплейстоценовыми и голоценовыми отложениями. На данном полигоне были обнаружены воронкообразные формы микро рельефа (покмарки) с признаками флюидоразгрузки.

Станции донного прооботбора выбраны с помощью данных многолучевого эхолотирования и сейсморазведки сверхвысокого разрешения. Обращалось внимание на аномалии на сейсмоакустических профилях и на характерные для флюидоразгрузки формы рельефа. На самом керне также были обнаружены признаки флюидоразгрузки, такие как следы дегазации осадка (вздутие керна), наличие в керне каналов дегазации, неравномерное уплотнение осадка, высокое содержание гидротроилита и распространение метан-потребляющих организмов *Rogonophora* [1].

Анализ органического вещества показал преимущественно смолисто-асфальтеновый состав битумоидов при низких концентрациях легких УВ. Миграционная жидкая компонента не обнаружена на исследуемых станциях ни по данным люминесцентно-битуминологического анализа, ни по данным газожидкостной хроматографии.

В донных осадках выделена газовая фаза, изученная в дальнейшем методом газовой хроматографии. В пределах исследуемых станций обнаружены значительные вариации в концентрациях метана в донных осадках. На фоновых станциях содержание метана не превышает 18 ppm; на ряде станций, расположенных в пределах центральных частей покмарок, максимальные значения достигают 760 ppm, при этом, количество метана увеличивается с глубиной. Гомологи метана до гексана присутствуют в небольшом количестве, достигая в сумме до 4 ppm. Наличие гомологов метана в таких низких концентрациях свидетельствуют о преимущественно бактериальном происхождении газовых УВ, что подтверждают и данные изотопных исследований углерода метана. Для станций, характеризующих сипы, значения варьируют в диапазоне от -60,45 до -81,58‰, что указывает на низкую долю глубинных газов. Чаще всего биогенные газы из донных отложений формируют фоновые газогеохимические поля, и концентрации углеводородов взаимосвязаны с количеством органического вещества в осадках. Вероятно, обнаруженные поля сипов имеют неглубокие корни и формируются вследствие активного формирования углеводородов биогенного происхождения в верхней диагенетической – раннепротокатагенетической зоне.

Экспедиционные работы выполнялись при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках: плана-программы экспедиционных исследований МГУ имени М.В. Ломоносова по теме «Особенности четвертичного седиментогенеза, рельефообразования и природной флюидоразгрузки на морском дне в северо-восточной части Карского моря» и

«Обучение-через-исследования на Арктическом шельфе»; государственного задания Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) «Дополнительное обеспечение системы образования в области морских наук – подготовка молодого кадрового резерва по научно образовательной программе «Плавающий университет» на основе комплексных исследований морей России и Мирового океана»; государственного задания ИО РАН «Обеспечение проведения научных исследований, а также экспериментальных разработок».

Список литературы

- 1) Ахманов Г.Г., Соловьева М.А., Монтелли А.И., Полудеткина Е.Н., Хлыстов О.М. Особенности постледникового донного рельефа и разгрузки флюидов в СВ Баренцевом море: по данным геолого-геофизических и геохимических исследований в экспедиции ТТН-19 (АНС48). Итоги экспедиционных исследований в 2020 году в Мировом океане и внутренних водах. 2021. С. 39-45.

ХАРАКТЕРИСТИКА ЗОН ФЛЮИДРАЗГРУЗКИ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРО-КАРСКОЙ ДЕПРЕССИИ

Кирсанова А.А., Полудеткина Е.Н., Басова Е.Д.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: геохимия, Карское море, арктический шельф, флюидоразгрузка, углеводороды.

Летом 2022 г. в северной акватории Карского моря проходила морская мультидисциплинарная экспедиция TTR-21 «Training Though Research – Обучение через исследования» при поддержке Министерства Науки и Высшего Образования РФ. Результаты экспедиции взяты за основу данной научной работы.

Для исследования был выбран самый южный ключевой участок работ – «Brachyuga», расположенный в северной части террасы Геркулеса (на южном склоне желоба Святой Анны). На участке «Brachyuga» обнаружены области распространения предположительно газонасыщенных отложений, протягивающихся с северо-западного угла ключевого участка «Brachyuga» на юг. По данным сейсморазведки сверхвысокого разрешения (ССВР) и акустического профилирования (АПр) кровля газонасыщенных отложений выделяется по повышенным амплитудам, резкой смене волновой картины на хаотичный тип записи и экранированию нижележащего разреза.

На данных многолучевого эхолотирования (МЛЭ) и гидролокации бокового обзора (ГЛБО) внутри контура распространения газонасыщенных отложений наблюдаются локальные изометричные отрицательные формы рельефа, подобные покмаркам; над покмарками часто наблюдаются факелы предположительной флюидоразгрузки. Большая часть покмарок расположена в зоне распространения газонасыщенных отложений, в центральной части участка. В пределах покмарок отобраны флюидонасыщенные осадки, представленные пелитовыми алевролитами с признаками газопроявлений, такими как растрескивание и вспучивание осадка.

Из керна были отобраны образцы на анализ порового газа и геохимические исследования органического вещества (ОВ). Для газовой фазы была проведена газовая хроматография (ГХ), для наиболее интересных образцов с повышенными концентрациями CH_4 был проведен изотопный анализ CH_4 и CO_2 . Для осадка был проведен люминесцентно-битуминологический анализ, по результатам которого были отобраны образцы для экстракции. Так как в экстрактах присутствовало большое количество серы, дополнительно была выполнена очистка от серы на медной колонке в качестве пробоподготовки для ГХ.

По результатам ГХ газовой фазы во всех образцах выявлено присутствие метана и его гомологов до C_5 включительно. Фоновыми концентрациями CH_4 приняты значения до 20 ppm. Максимальные концентрации, более 100 ppm, зафиксированы в 2 образцах из трубки TTR21-AR318G (111,4 и 289,2 ppm), которая была отобрана рядом с бороздой выпашивания айсберга, и 2 образцах из станции TTR21-AR322G (193,5 и 148,3 ppm), отобранной из центральной части покмарки.

Изотопный анализ углерода метана проведен для 8 образцов. В 5 образцах присутствует биогенный метан, это подтверждается не только наличием более низким значением отношения стабильных изотопов $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, но и доминированием этилена и пропилена над этаном и пропаном соответственно [1]. В частности, CH_4 из образцов с аномально высокими концентрациями в станции TTR21-AR318G является смешанным с бактериальной составляющей (-70,01 – -60,37 ‰ VPDB). Выявлены 3 образца, характеризующиеся наличием наиболее высоким показателем отношения $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (-38,98, -28,59, -26,79‰ VPDB), природа углеводородов (УВ) которых является сугубо или практически полностью термогенной. Такие значения изотопного состава углерода метана могут быть объяснены фокусированной разгрузкой глубинного метана, образованного в главной зоне нефтеобразования, практически не затронутого бактериальными процессами.

По результатам люминесцентно-битуминологического анализа качественно определен состав битумоидов в отобранных образцах донных отложений. Практически во всех образцах присутствовала легкая компонента, также отмечается наличие компонент группы смол и масел. Редко присутствовали асфальтены. Интересно отметить, что на вытяжках битумоида образовывались кристаллы серы.

Газовая хроматография подготовленных экстрактов выполнена для 5 образцов. Распределение алканов преимущественно мономодальное с максимумами на пиках C_{27} , C_{29} , C_{31} . Для высокомолекулярной области характерно гребенчатое распределение с преобладанием нечетных над четными алканами, свидетельствующее о сингенетичном типе ОВ и его низкой степени преобразованности [2]. В среднемoleкулярной части C_{21} - C_{24} отмечается рост концентраций углеводородов с нормальной четностью, вероятно, являющееся отражением миграционной составляющей термогенного генезиса. Отношение изопренанов пристана к фитану Pr/Ph во всех исследованных образцах указывает на морской генезис исходного органического вещества.

Таким образом, выполненные исследования позволили оценить значительный вклад углеводородов термогенного генезиса в формирование флюидонасыщения придонных осадков. Дальнейшие детальные исследования, включающие хроматомасс-спектрометрический и изотопный анализ фракций ОВ позволят пролить свет на источник миграционных флюидов и характеристику нефтегазогенерирующих отложений.

Список литературы

- 1) Ривкина Е.М., Краев Г.Н., Кривушин К.В. и др. Метан в вечно мерзлых отложениях северо-восточного сектора Арктики // Криосфера Земли № 3 (10). 2006. С. 23–41
- 2) Гордадзе Г.Н. Углеводороды в нефтяной геохимии. Теория и практика. – М.: Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015. – 559 с.: ил.

УТОЧНЕНИЕ ИСТОРИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ МЕГАВАЛА НАЛИВКИНА (КАРСКОЕ МОРЕ)

Кишанков А.В.¹, Полудеткина Е.Н.², Юмашева А.К.^{1,2}, Басова Е.Д.², Кирсанова А.А.²,
Токарев М.Ю.²

¹Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, г. Москва

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: Карское море, углеводороды, сейсморазведка, тектоника.

В июле-августе 2022 г. состоялась экспедиция ТТР-21 в северную часть Карского моря, организованная Учебно-научным центром ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике при МГУ имени М.В. Ломоносова. Целью экспедиции являлось изучение ледниковых форм рельефа морского дна, состава придонных отложений, строения верхней части разреза осадочного чехла, флюидонасыщенности приповерхностных осадков. Одним из объектов исследования в ходе экспедиции являлась южная часть мегавала Наливкина – крупной линейной структуры, простирающейся с юго-запада на северо-восток в северо-восточной части акватории Карского моря. Изучение верхней части разреза осадочного чехла, содержания и состава флюидов в придонных осадках имеет практическое значение для прогноза нефтегазоносности рассматриваемого региона, поскольку исследование флюидопроявлений на поверхности, с учетом структурно-тектонических данных, даёт информацию о глубинных процессах образования залежей углеводородов (УВ).

Фундамент Северо-Карского осадочного бассейна сложен кембрийскими и более древними метаморфизованными породами [1]. Осадочный чехол состоит из двух основных структурных этажей – докаменноугольного и каменноугольного-мезозойского. Между данными этажами на сейсмических разрезах четко прослеживается угловое несогласие. В верхнем структурном этаже каменноугольные и пермские породы маломощны или размыты, мезозойский комплекс прослеживается из Восточно-Баренцевского бассейна, с которым Северо-Карский бассейн в соответствующее время составлял единый бассейн осадконакопления [2]. Мезозойский комплекс перекрывается четвертичными отложениями ледникового, ледниково-морского и морского генезиса.

Нижний структурный этаж по составу является терригенно-карбонатным, верхний – преимущественно терригенным, кроме того, в среднем ордовике присутствуют эвапориты [2]. Нефтегазоматеринские толщи прогнозируются, по аналогии с разрезами Таймыра, Северной Земли и Восточной Сибири, в ордовике, силуре и девоне [2]. В данных комплексах также прогнозируется наличие резервуаров и флюидоупоров.

Складчатые структуры в Северо-Карском бассейне формировались на разных этапах истории развития региона. Основная фаза образования складок имела место на рубеже девона и карбона, после которой произошел интенсивный размыв и образовалось региональное угловое несогласие, отмеченное выше [1]. Также инверсионные структуры формировались на рубеже ордовика и силура, силура и раннего девона, раннего и среднего девона. Формирование мегавала Наливкина началось, предположительно, на рубеже силура и девона, и его рост продолжался на последующих этапах тектонических деформаций [3]. Мегавал в настоящее время имеет асимметричное строение – с запада он облекается полого залегающими толщами, предположительно, девонско-го возраста, на востоке поднятие ограничено крутозалегающими, видимо, взброшенными слоями, возможно, включающими породы фундамента. На юге мегавала Наливкина взброшенные слои находятся примерно в 10 км к востоку от основной части структуры, формируя отдельное локальное поднятие.

В ходе экспедиции ТТР-21 был проведен комплекс геолого-геофизических исследований – выполнялась сейсморазведка сверхвысокого разрешения (количество каналов – 16, шаг между каналами – 2 м), акустическое профилирование, отбор донных отложений (при помощи прямоточной

гравитационной трубы длиной 3 и 4,5 м) для литолого-геохимических анализов. Детально изучалось локальное поднятие, образованное взброшенными древними слоями к востоку от мегавала Наливкина, отмеченное выше.

Над указанным поднятием были отобраны четвертичные осадки, и получена газовая фаза из данных отложений. По результатам компонентных и изотопных исследований газовой фазы и хроматографического анализа битумоидов установлено наличие в придонных отложениях миграционных газообразных и жидких УВ. По сейсмическим данным сделан вывод о том, что вследствие складчато-надвиговых деформаций, к своду поднятия с высокой вероятностью подходят осадочные слои ордовика и силура, в которых, как отмечено выше, прогнозируются элементы УВ систем, которые могут являться продуцирующими толщами для миграционных флюидов.

Экспедиционные работы выполнялись при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках: плана-программы экспедиционных исследований МГУ имени М.В. Ломоносова по теме «Особенности четвертичного седиментогенеза, рельефообразования и природной флюидоразгрузки на морском дне в северо-восточной части Карского моря» и «Обучение-через-исследования на Арктическом шельфе»; государственного задания Федеральному государственному автономному образовательному учреждению высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» «Дополнительное обеспечение системы образования в области морских наук – подготовка молодого кадрового резерва по научно образовательной программе «Плавучий университет» на основе комплексных исследований морей России и Мирового океана»; государственного задания ИО РАН «Обеспечение проведения научных исследований, а также экспериментальных разработок».

Список литературы

- 1) Малышев Н.А., Никишин В.А., Никишин А.М., Обметко В.В., Мартиросян В.Н., Клещина Л.Н., Рейдик Ю.В. Новая модель геологического строения и истории формирования Северо-Карского осадочного бассейна // Доклады академии наук. – 2012. – Т. 445. – №. 1. – С. 50-50.
- 2) Старцева К.Ф. Этапы формирования Восточно-Баренцевского и Северо-Карского бассейнов на основе сейсмостратиграфического анализа: дисс. – М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2018. – 165 с.
- 3) Никишин В.А. Внутриплитные и окраинноплитные деформации осадочных бассейнов Карского моря: дисс. – М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2013. – 135 с.

АУТИГЕННЫЕ МИНЕРАЛЫ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЮЖНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ (ПО МАТЕРИАЛАМ 89-ОГО РЕЙСА НИС «АКАДЕМИК МСТИСЛАВ КЕЛДЫШ» 2022 ГОДА)

Козина Н.В., Кравчишина М.Д., Новичкова Е.А., Сломнюк С.В., Филиппов А.С.,
Киреенко Л.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Карское море, осадконакопление, минералогия, диагенез, аутигенные минералы, вивианит.

В работе представлены литолого-минералогические исследования донных отложений западной части Карского моря. Особое внимание уделено аутигенному минералообразованию. Аутигенное минералообразование (аутигенез) – процесс, при котором происходит образование минералов *in situ* [1]. Образование аутигенных минералов происходит в процессе седиментации и последующих диагенетических преобразований осадка на месте его захоронения в результате биогеохимических и физико-химических процессов [2]. Аутигенные минералы являются важными индикаторами среды, в которой происходило формирование отложений, а также процессов преобразования осадков.

В Карском море довольно хорошо изучено конкрециеобразование [3], которое широко развито в осадках, в результате чего происходит агрегирование аутигенных минералов. Установлено присутствие железомарганцевых конкреций (ЖМК) в областях Притаймырского мелководья, Южной мелководной равнины и Юго-Западной крупнохолмистой равнины. Но аутигенные минералы в отложениях Карского моря изучены недостаточно. Их изучение может значительно дополнить представления об истории седиментации и диагенезе.

Материалом для исследования послужили донные осадки, отобранные дночерпателем и трубкой большого диаметра в южной части Карского моря в 89-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш». На борту судна были проведены первичные литолого-геохимические и микропалеонтологические исследования донных осадков. В лабораториях ИО РАН проводилось изучение кернов с помощью автоматизированной системы комплексного исследования кернов (MSCL-XYZ GEOTEK), а также проводился комплекс минералогических методов исследования осадков.

Авторами обнаружены различные морфологические типы ЖМК на глубинах от 98 до 126 м в районе Западно-Карской ступени на поверхности окисленных илов, пелитовых алевролитисто-песчаных темно-коричневых оттенков, которые подстилаются восстановленными пелитовыми илами темно-серого цвета со стяжениями гидротроилита. Кроме того, ЖМК были обнаружены на контакте окисленных и восстановленных осадков, а также чуть ниже контакта, в восстановленном осадке. Толщина окисленного слоя изменяется от 3 до 7 см. ЖМК представляют собой сфероидальные и дискоидальные образования с кольцами роста, иногда с загнутыми краями, размером от 1-2 до 4.5-13.5 см в диаметре, соответственно. На поверхности некоторых конкреций наблюдаются следы жизнедеятельности микроорганизмов, а на срезе – отчетливое чередование марганцевых и железистых слоев.

Осадочная толща мощностью 619 см, вскрытая колонкой 7444 в центральной части Западно-Карской ступени, представлена однородными пелитовыми илами темно-серого цвета с многочисленными включениями гидротроилита и единичными раковинами двустворчатых моллюсков в интервале 300–541 см. Для забоя колонки отмечена характерная пористая текстура, образующаяся при дегазации осадка. По всей длине колонки обнаружен вивианит – водный фосфат железа, представляющий собой конечный продукт анаэробного микробного процесса восстановления трехвалентного железа [1]. В морских условиях вивианит образуется в ходе диагенеза в бескислородных условиях с участием притока пресных вод различного происхождения [4]. Ближайшие

из известных находок вивианита в осадках арктических морей описаны для юго-западного шельфа Шпицбергена и внешнего шельфа моря Лаптевых [5, 6]. Вивианит в осадках колонки 7444 встречается как в виде кристаллов и их сростков, так и в виде конкреций и их сростков. Цвет вивианита изменяется по мощности керна от голубого (кристаллы вивианита) до серо-синего и сине-черного (микроконкреции вивианита) в верхней части колонки и до зеленого (кристаллы и микроконкреции) в нижней части колонки. Кроме того, в осадках данной колонки встречаются аутигенные минералы из группы карбонатов и группы сульфидов, а также окислы и гидроокислы железа.

Колонка 7441, отобранная в районе Ленинградского газоконденсатного месторождения, вскрывает в верхней части (0–456 см) морские алевритово-пелитовые илы насыщенно темно-серого цвета с включениями гидротроилита и единичными включениями раковин двустворчатых моллюсков. Нижняя часть колонки (456–485 см) сложена чередующимися прослоями алевритово-пелитовых илов темно-серо-коричневого цвета и песков серого цвета. Осадки колонки характеризуются наличием ЖМК (21–23 см) и карбонатных корок преимущественно в интервале 25–108 см.

Таким образом, исследование донных отложений выявило широкое развитие аутигенной минерализации в виде конкреций, микроконкреций и кристаллов в южной части Карского моря. Впервые в осадках Карского моря обнаружены кристаллы и микроконкреции вивианита. Дальнейшие исследования аутигенных минералов и условий их образования в донных отложениях позволят выявить ряд ведущих факторов, определяющих процессы седименто- и диагенеза в данном районе.

Авторы выражают благодарность заместителям начальника экспедиции Клювиткину А.А. и Новигатскому А.Н., капитану Горбачу Ю.Н., экипажу и научному составу экспедиции.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИО РАН № FMWE-2021-0006.

Список литературы

- 1) Япаскурт О.В. Генетическая минералогия и стадийный анализ процессов осадочного пороодо- и рудообразования. Учеб. пособие. М.: ЭСЛАН, 2008. 356 с.
- 2) Glenn C.R., Filippelli G.M. Authigenic mineral formation in the marine environment: Pathways, processes and products // *Deep Sea Research II*. 2007. V. 54. P. 1141–1146.
- 3) Богданов Ю.А., Горшков А.И., Гурвич Е.Г. и др. Железомарганцевые конкреции Карского моря // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 789–800.
- 4) Rothe M., Kleeberg A., Hupfer M. The occurrence, identification and environmental relevance of vivianite in waterlogged soils and aquatic sediments // *Earth-Science Reviews*. 2016. V. 158. P. 51–64.
- 5) Logvina E., Krylov A., Taldenkova E. et al. Mechanisms of Late Pleistocene authigenic Fe–Mn-carbonate formation at the Laptev Sea continental slope (Siberian Arctic). *Arktos* 4, 1–13 (2018).
- 6) Łącka M., Michalska D., Pawłowska J., et al. Multiproxy paleoceanographic study from the western Barents Sea reveals dramatic Younger Dryas onset followed by oscillatory warming trend // *Scientific Reports*, 2020.10(1).

НЕФТЯНЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ В БАРЕНЦЕВОМ, КАРСКОМ И ЛАПТЕВЫХ МОРЯХ В 2016-2020 ГГ.

Колтовская Е.В., Немировская И.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: нефтяные и алифатические углеводороды, Арктика, донные осадки.

Изучение углеводородов (УВ) в составе взвешенного вещества и его компонентов – взвешенного органического углерода (Сорг), липидов, хлорофилла «а» – в высокоширотных акваториях в значительной степени обусловлено высоким нефтегазоносным потенциалом арктического шельфа, который, по последним оценкам, превышает 100 млрд т в нефтяном эквиваленте. При этом на шельф Баренцева моря приходится 24% от суммарных углеводородных запасов [1]. При освоении месторождений и увеличении транспортировки топлива возрастает риск загрязнения арктического бассейна нефтяными УВ. Определенный вклад в содержание УВ вносят их природные поступления из осадочной толщи [2].

В условиях меняющегося климата в последние годы в экосистеме арктических морей, и в частности Баренцева моря, произошли значительные изменения, так как увеличилось влияние атлантических вод [3]. Поэтому существенно сократилась площадь многолетних льдов и произошло освобождение шельфа от зимнего льда, в результате чего первичная продукция (ПП) фитопланктона возросла в среднем на 28 % [3]. Изменение ПП должно оказать влияние на концентрации УВ – постоянных компонентов ОВ [4].

Для изучения изменчивости распределения углеводородов в составе взвеси в процессе седиментации в период с 16 августа по 20 сентября 2018 г. во время межени (72 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш») было проведено ее исследование в различных районах Карского и Лаптевых морей. Впервые были изучены потоки и состав УВ в седиментационных ловушках [5].

Для исследования УВ во взвеси пробы воды были собраны батометрами Нискина. Донные осадки отбирали из дночерпателя «Океан» (слой 0–2 см) и мультикорера (колонку осадка делили по слоям 0–1, 1–2 и т. д.), сушили при температуре 50°C, отсеивали фракцию 0,25 мм. Для определения органических соединений (Сорг, липидов и алифатических углеводородов– УВ) пробу (3–5 л) фильтровали стекловолокнистые фильтры. Подробно методика дальнейшей пробоподготовки и лабораторных анализов описана в работе [6].

Содержание УВ в поверхностных водах зависит от концентрации взвеси, так как между этими величинами наблюдается корреляция ($r = 0.74$). Увеличение концентраций УВ в барьерных зонах (>30 мкг/л) происходит в меньшей степени, чем взвеси. В большинстве изученных районов содержание УВ соответствует фоновым величинам и не превышает 20 мкг/л. Меньшая продуктивность моря Лаптевых по сравнению с Карским морем, обуславливает более низкие концентрации УВ. Из-за минерального характера взвеси минимальные концентрации УВ (8–10 мкг/л) установлены в заливе Благополучия о. Новая Земля.

В поверхностных водах Баренцева моря произошел рост концентраций алифатических УВ во взвеси с 2,8–8,3 (2016–2017 гг.) до 20–23 (2019–2020 гг.) мкг/л, обусловленный прикромочным цветением. Климатические изменения, вызвавшие увеличение ПП в Баренцевом море, привели также к росту концентраций УВ. Повышенное содержание УВ в южной части Баренцева моря (до 58 мкг/л, 2020 г.) связано не только с возросшим судоходством, но и с коколитовидным цветением, то есть природные процессы приводят к формированию более высоких концентраций УВ.

В поверхностном слое донных осадков увеличение концентраций УВ (до 48–186 мкг/г) происходит в зонах разломов (Стурфиорд, Медвежинский желоб и т.д.), а для ПАУ – в углистых месторождениях Шпицбергена (15 250–16 970 нг/г). Различный генезис алифатических УВ и ПАУ

приводит к отсутствию корреляции в распределении этих углеводородных классов, а также их связи с Сорг.

В толще осадков разгрузка эндогенных флюидных потоков, изменчивость окислительно-восстановительной обстановки способствует не только утилизации отдельных компонентов в составе УВ, но и образованию автохтонных низкомолекулярных алканов, а в составе ПАУ – нафталинов.

В настоящее время природные процессы, происходящие в Баренцевом море, оказывают большее влияние на формирование состава и уровней алифатических УВ и ПАУ, чем антропогенные.

Экспедиции проведены в рамках госзадания Минобрнауки России (тема № 0128-2021-0006). Работы выполнялись при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00234) и гранта РФФИ 20–35–90025.

Список литературы

- 1) Каминский В.Д., Супруненко О.И., Смирнов А.Н., Медведева Т.Ю., Черных А.А., Александрова А.Г. Современное ресурсное состояние и перспективы освоения минерально-сырьевой базы шельфовой области Российской Арктики // Разведка и охрана недр. 2016. № 9. С. 136–142.
- 2) АМАР (Arctic Monitoring and Assessment Programme). Sources, Inputs and Concentrations of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and other Contaminants Related to Oil and Gas Activities in the Arctic. Chapter 4. Oslo, Norway, 2007, 87 p.
- 3) Arrigo K.R., van Dijken G.L. Continued increases in Arctic Ocean primary production // Progr. Oceanog. 2015. Vol. 136. P. 60–70.
- 4) Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 2001. 376 с.
- 5) Лукашин В.Н., Клювиткин А.А., Лисицын А.П., Новигатский А.Н. Малая седиментационная ловушка МСЛ-110 // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 746–750.
- 6) Немировская И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). Москва: Научный мир, 2013., 343 с.

ПАЛЕООКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В РАЙОНЕ ДРИФТА ГАРДАР (СЕВЕРО-ВОСТОЧНАЯ АТЛАНТИКА) В ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНОЕ ВРЕМЯ

Кулешова Л.А.¹, Баширова Л.Д.^{1,2}, Дорохова Е.В.^{1,2}, Новичкова Е.А.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

Ключевые слова: палеоокеанологические реконструкции, осадконакопление, скорость придонного течения, фораминиферы.

В рамках данной работы исследована колонка донных осадков АМК-5687 (59°29.916' с.ш., 24°40.001' з.д., глубина 2530 м, длина колонки 30 см), отобранная мультикорером в районе контуритового дрефта Гардар в 71 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2018 г.) [1]. На основе изотопно-геохимических данных, масс-спектрометрического радиоуглеродного датирования (AMS-¹⁴C), показателя среднего размера сортируемого сита (ССС, среднего размера минеральной фракции 10-63 мкм), а также микропалеонтологического анализа планктонных (ПФ) и бентосных фораминифер (БФ) были получены высокоразрешающие реконструкции поверхностных и придонных условий за последние ~340 лет. Данный временной интервал соответствует второй половине Малого ледникового периода (МЛП) и Современному периоду потепления (СП). Скорость осадконакопления составила ~0.1 см/год.

Видовой состав комплексов БФ и ПФ изучался с шагом 2-4 см в гранулометрических фракциях >100 мкм и >150 мкм соответственно. Всего проанализировано более 5500 раковин ПФ и БФ, среди которых определено более 120 видов, принадлежащих к 70 родам. Определено 8 сборных родовых групп. Получены количественные температурные реконструкции на основе распределения видов ПФ. С помощью индексов биоразнообразия Фишера α и доминирования Симпсона, выделены периоды благоприятных и стрессовых условий для жизни фауны БФ.

В среднем за последние 340 лет рассчитанная температура поверхностных вод (0-50 м) изменялась в пределах ~8-9.2 °C и 10-11.5 °C для зимнего и летнего периодов соответственно. Минимальные температуры (летние и зимние) реконструированы в интервале 25-26 см (225 кал.л.н., или 1725 г.) после периода низкой солнечной активности, названного минимумом Маундера и длившегося примерно с 1645 по 1715 гг. Последующее потепление в 1720-х гг., по-видимому, вызвало таяние морского льда в северных широтах и, как следствие, появление в районе исследования холодной распресненной «шапки» в верхнем слое. Судя по данным микропалеонтологического анализа ПФ, данное событие сопровождалось резким увеличением доли субполярного вида *Turborotalita quinqueloba* и одновременным уменьшением содержания подповерхностного вида *Globorotalia inflata*, что может указывать на приближение Субарктического фронта (САФ) к востоку от хребта Рейкьянес и подъем термоклина. Дальнейшее потепление привело к прогреву поверхностного и подповерхностного слоев на рубеже перехода от МЛП к СП. Наблюдаемые пики роста температур закономерно коррелируют с минимумом на изотопно-кислородной кривой. В сообществе ПФ постепенно уменьшается процентное содержание вида *T. quinqueloba*, что свидетельствует об отступлении САФ севернее и западнее района исследования. Доминирование бентосного вида *Epistominella exigua* в пределах данного интервала отражает возникновение резких всплесков роста биопродуктивности поверхностных вод и сезонный характер их проявлений [3]. Повышенные значения индекса биоразнообразия Фишера α и низкие значения индекса доминирования в интервалах 1750-1790 и 1940-2010 гг. свидетельствуют об увеличении биопродуктивности поверхностных вод. Последнее также подтверждается относительно высоким содержанием органического углерода и карбоната кальция в осадке.

На основе распределения полученных палеоиндикаторов можно выделить три интервала изменчивости придонных условий. В пределах первого интервала (1650-1860 гг.) наблюдается про-

явление холодного события МЛП: относительно низкие скорости придонных течений, судя по значениям ССС, и менее аэрируемые условия вблизи дна. На последнее указывает совсем небольшое превалирование видов БФ, относящихся к эпифауне и поверхностной инфауны, над представителями глубокой инфауны. Второй выделенный интервал (1860-1950 гг.) характеризуется качественным изменением свойств придонных вод: в конце МЛП происходит усиление придонной циркуляции, снижаются значения $\delta^{13}\text{C}$ в составе раковин *E. exigua*, повышается агрессивность вод по отношению к карбонатным компонентам осадка, связанная с увеличением содержания в них растворенного углекислого газа и бикарбонат-иона. Присутствие в комплексе значительной доли (до 30%) обломков раковин ПФ и следы коррозии на раковинах БФ отражает возросшую агрессивность среды. Третий интервал охватывает последние ~70 лет. Преобладание в колонке видов БФ, относящихся к эпифауне, над инфауной указывает на повышение содержания кислорода на границе вода-осадок [4]. Также снижается содержание растворенного углекислого газа в придонных водах, судя по изменениям изотопно-углеродного состава раковин *E. exigua*. Возросшая численность агглютинированных раковин в сообществе БФ, по-видимому, связана с более равномерным в течение года поступлением ОВ на дно [2], а не процессов раннего диагенеза осадков нижележащих горизонтов. Данное предположение объясняется присутствием устойчивых к разрушению видов *Ammoglobigerina globigeriniformis*, *Cribrostomoides* spp., *Lagenamina* spp., *Reophax* spp. Кроме того, на развитие агглютинированных видов могли повлиять благоприятные для них условия ослабления скоростей придонных течений, что приводило к накоплению ненарушенной толщи осадка.

Геохимические исследования проведены в рамках госзадания ИО РАН (тема №FMWE-2021-0012), микропалеонтологический анализ и интерпретация данных – при поддержке гранта РФФИ (№22-17-00170).

Список литературы

- 1) Новигатский А.Н., Гладышев С.В., Клювиткин А.А., Козина Н.В., Артемьев В.А., Коченкова А.И. Мультидисциплинарные исследования в Северной Атлантике и прилегающей Арктике в 71-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» // Океанология. – 2019. – Т. 59. – №. 3. – С. 510–512.
- 2) Kuhnt W., Collins E., Scott D.B. Deep water agglutinated foraminiferal assemblages across the Gulf Stream: distribution patterns and taphonomy / In: Hart M.B., Kaminski M.A., Smart C.W. (Eds.) Proceedings of the Fifth International Workshop on Agglutinated Foraminifera. Grzybowski Foundation Special Publication. – 2000. – Vol. 7. – P. 261–298.
- 3) Smart C.W., Waelbroeck C., Michel E., Mazaud A. Benthic foraminiferal abundance and stable isotope changes in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean during the last 20 kyr: Paleoceanographic implications // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2010. – Vol. 297. – P. 537–548.
- 4) Van der Zwaan G.J., Duijnste I.A.P., Den Dulk M., Ernst S.R., Kouwenhoven N.T. Benthic foraminifera: proxies or problems? A review of paleoecological concepts // Earth Sciences Reviews. – 1999. – Vol. 46. – P. 213–236.

ЛИТОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛОНКИ ДОННЫХ ОСАДКОВ, ОТОБРАННОЙ НА ПУТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАТОКОВ СЕВЕРОМОРСКИХ ВОД В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ

Ласкина Д.Н.^{1,2}, Дорохова Е.В.^{1,2}

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: донные осадки, палеорекоконструкция, рентгено-флюоресцентный анализ, магнитная восприимчивость, Балтийское море.

Балтийское море является внутриконтинентальным и характеризуется затруднённым водообменом с Северным морем. Стратификация вод и высокая антропогенная нагрузка обуславливают появление во впадинах Балтийского моря бескислородных «мёртвых» зон и восстановительных условий. Периодические затоки солёных и насыщенных кислородом североморских вод способствуют обновлению придонных водных слоёв впадин и формированию окислительных условий.

Колонки донных осадков представляют собой «архивные записи» условий осадкообразования, отражающих, в том числе, гидрологические события затоков североморских вод. В восточной части Гданьской впадины на пути распространения затоков в ноябре 2022 г. была отобрана колонка донных осадков АСВ-54029 (55,273° с. ш., 19,694° в. д., глубина отбора 98,5 м, длина 3,54 м). Цель исследования – реконструировать придонные условия в Гданьской впадине за последние 8500 лет (морская стадия Балтийского моря) на основе литологических данных.

Литологические исследования включали определение элементного состава осадков колонки с помощью рентгено-флюоресцентного анализа (РФА) и анализа магнитной восприимчивости (МВ). РФА производился портативным энергодисперсионным анализатором Olympus Vanta-C с серебряным анодом, кремниевым дрейфовым детектором и рентгеновской трубкой 4 Вт. Использовались относительные и абсолютные содержания элементов, пересчитанные на влажность осадка. Анализ МВ был выполнен с помощью системы измерения Bartington MS3 с поверхностным сканирующим датчиком Bartington MS2E. Интервал измерений составил 1 см для РФА и 0,5 см для МВ.

Согласно литологическому описанию, в колонке выделено две секции: верхняя – илы морской литориновой стадии (0-123 см) и нижняя – глины озёрной анциловой стадии (124-354 см). Секции различаются по цвету, структуре и текстуре, а также резким изменением значений МВ на границе секций, маркирующим переход от озёрной к морской стадии. Исследовалась верхняя секция, соответствующая литориновой стадии. На основе полученных результатов были построены графики вертикального распределения таких показателей, как Pb и Mo, а также соотношения элементов S/Ti и Zr/Rb, МВ и содержание влаги.

Концентрации свинца в колонке показывают типичную для Балтийского моря картину: в верхних горизонтах 0-35 см содержание этого элемента заметно выше (максимальное значение 32 ppm на горизонте 3 см), чем в нижних (0-12 ppm). Это связано с увеличением его поступления в последние 800 лет в результате антропогенной деятельности [1]. Присутствие Mo на горизонтах 22-47 см и 89-118 см вместе с ростом показателя S/Ti, который достигает значений 1-3, свидетельствует о более частых стагнационных периодах и более редких или малых по интенсивности затоках в этот отрезок времени [2]. Это подтверждается наличием микрослоистости на этих горизонтах по данным литологического описания, что свидетельствует об отсутствии биотурбирующих организмов вследствие дефицита кислорода в придонном слое [3]. Соотношение Zr/Rb отражает гранулометрический состав осадка и в целом показывает тенденцию уменьшения его размера примерно с 65 см и до поверхности. Это может свидетельствовать об уменьшении интенсивности придонных течений, позволяющем формироваться более тонкому осадку. На горизонте 89-110 см наблюдается

рост показателя Zr/Rb , что может указывать на интенсивную придонную гидродинамику вследствие более частых затоков в этот период. Однако ниже, на горизонтах 110-123 см размер осадка уменьшается. Понижение магнитной восприимчивости наблюдается на 89-110 см и соответствует увеличению соотношения S/Ti и концентрации Mo , что свидетельствует о восстановительных условиях [2]. Повышенная магнитная восприимчивость и пониженные S/Ti и концентрации Mo , а также наличие ракушечного детрита на 115-123 см (нижняя часть литориновой секции) свидетельствуют о периодическом насыщении придонной воды кислородом в этот период, что, вероятно, связано с литориновой трансгрессией в результате открытия Датских проливов около 8500 лет назад [4].

Таким образом, в колонке донных осадков, отобранной в Гданьской впадине на пути распространения североморских вод, выделены интервалы увеличения интенсивности затоков (22-47 см и 110-123 см, что примерно соответствует постлиториновой стадии, 3500-850 лет назад и началу литориновой стадии, 8100-7000 лет назад соответственно) и горизонты, отражающие периоды гипоксии: 0-22 см (современное Балтийское море) и 89-110 см (литориновая стадия, 7000-3500 лет назад) [5]. Для более точной реконструкции гидрологических событий планируется выполнить дополнительные анализы, в том числе гранулометрический и определение возраста осадков.

Экспедиционные работы и литологическое описание выполнены в рамках госзадания ИО РАН (тема №FMWE-2021-0012); РФА и анализ МВ, а также интерпретация полученных результатов в рамках гранта РФФ №22-17-00170.

Список литературы

- 1) Zillén L. Stable lead (Pb) isotopes and concentrations - A useful independent dating tool for Baltic Sea sediments // *Quaternary Geochronology* – 2012. – № 8. – P. 41-45.
- 2) Balascio N.L. A multi-proxy approach to assessing isolation basin stratigraphy from the Lofoten Islands, Norway // *Quaternary Research* – 2011. – № 75. – P. 288-300.
- 3) Zillén L. Past occurrences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact // *Earth-Science Reviews* – 2008. – № 91. – P. 77-92.
- 4) Rosentau A. The Baltic Sea Basin // *Submerged Landscapes of the European Continental Shelf: Quaternary Paleoenvironments* – 2017. – P. 103-133.
- 5) Andrén E. Holocene history of the Baltic Sea as a background for assessing records of human impact in the sediments of the Gotland Basin // *The Holocene* – 2000. – № 10,6. – P. 687-702.

МИКРОПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКИЙ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БЕНТОСНЫХ ФОРАМИНИФЕР ИЗ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НОРВЕЖСКОГО МОРЯ

Лозинская Л.А., Матуль А.Г., Новичкова Е.А., Чеховская М.П.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: микропалеонтология, кластерный анализ, палеоокеанология, морская геология.

Норвежское море является ключевым местом водообмена между Арктическим и Атлантическим бассейнами. Современные условия исследуемого бассейна формируются под влиянием теплых водных масс Северо-Атлантического течения, проникающих в Норвежское море. Однако и сейчас, и в определенные интервалы позднечетвертичного времени их воздействие может уменьшаться за счет активизации холодных водных масс, приводящей к глобальным изменениям климата [1].

Многолетний опыт исследования морских осадков показал, что микропалеонтологический анализ является надежным источником информации об идентификации и сопоставлении слоёв отложений и природных условий. В отличие от других микроорганизмов, современные фораминиферы считаются одной из широко распространённой групп, обитающих в Мировом океане, а их ископаемая форма устойчива к разным процессам седиментации [2].

Цель исследования – на основе изучения комплексов бентосных фораминифер провести биостратиграфическое расчленение толщ донных колонок и реконструкцию кратковременных климатических событий, а также с помощью статистики подтвердить или опровергнуть полученные закономерности.

В июне 2019 г. состоялся 75-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», направленный на комплексное океанологическое исследование морей Северной Атлантики [3]. В ходе рейса получен ряд осадочных колонок с помощью мультикорерного пробоотборника Mini Muc K/MT 410. В данном исследовании использованы разрезы осадков, отобранные на станциях АМК-6142 (69°02.674' с.ш., 02°06.611' з.д.; глубина моря 3181 м), расположенной в юго-западной части Лофотенской котловины, и АМК-6150 (74° 46.813' с.ш., 08° 26.052' з.д.; глубина моря 3013 м), которая находилась на восточном склоне хр. Книповича, северном продолжении Срединно-Атлантической спрединговой системы. Мощность вскрытых колонок составляет 27 и 31 см, соответственно.

Материалом для исследования бентосных фораминифер стали 57 проб донных осадков. Образцы были отобраны послойно с интервалом 1 см и промыты через сито с диаметром ячейки 63 мкм. Изучение раковин бентосных фораминифер проводилось под стереомикроскопом Nikon SMZ800N с увеличением 80х. Для достоверного качественного и количественного микропалеонтологического анализа в пробе насчитывали не менее 150–300 раковин бентосных фораминифер [4].

Результаты литологического описания обеих колонок показали, что отложения в основном представлены темно-коричневыми алевритистыми илами. В колонке АМК-6150 предварительный анализ планктонных фораминифер фиксирует исчезновение этих микроорганизмов на уровне 20 см, вероятно, из-за растворения кальцита. При формировании всего разреза на поверхности воды существовали условия, создававшиеся под влиянием Арктического фронта. И только в интервале выше 2 см они сменяются на современные, более тепловодные. Планктонные фораминиферы колонки АМК-6142 обнаружены на всем протяжении интервала. Условия были схожи с современными, однако, в интервале 17–9 см наблюдается сильное увеличение процентного содержания полярных видов, указывающих на близость Арктического фронта [5].

Данные радиоуглеродного датирования осадков колонок еще не готовы, однако, резкая смена численности и состава комплексов бентосных фораминифер в колонке АМК-6150 на уровне 23 см регистрируют границу, соответствующую переходу от ледниковых к современным межледниковым условиям. Предположительный интервал образования осадков колонки – последние 17 тыс. лет. Пик развития фораминифер, связанный с увеличением органического вещества, вероятно, указывает на становление условий оптимума среднего голоцена, который отмечается с уровня 16–15 см. Но записи планктонных и бентосных фораминифер могут говорить о различном ходе палеоусловий на поверхности и у дна. В колонке АМК-6142 планктонные и бентосные фораминиферы показывают схожий тренд палеоусловий. Разрез колонки АМК-6142 МК, предположительно, сформировался за последние ~6 тыс. лет.

Статистический анализ, который включает методы кластеризации, главных компонент, и неметрического многомерного масштабирования, используется в микропалеонтологии при изучении поверхностных осадков. Применение этих методов к нашему материалу по голоценовым осадкам также позволяет получить результаты по климатостратиграфии, подтверждающие описания комплексов фораминифер как в длинных, так и коротких (по охвату времени) колонках донных осадков.

Работа выполнена по проекту РНФ № 21-17-00235.

Список литературы

- 1) Дмитренко О.Б., Мухина В.В. Микрофоссилии в верхнечетвертичных осадках Норвежского моря (биостратиграфия и палеоокеанология) // *Океанология*. 2008. Т. 48. № 5. С. 778–793.
- 2) Саидова Х.М. Бентосные фораминиферы Мирового океана (зональность и количественное распределение) // М.: Наука, 1976. 160 с.
- 3) Ключиткин А.А., Кравчишина М.Д., Немировская И.А. и др. Исследование седиментосистем Европейской Арктики в 75-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 63. С. 421–423.
- 4) Fatela F., Taborda R. Confidence limits of species proportions in microfossil assemblages // *Marine Micropaleontology*. 2002. V. 45. I. 2. P. 169–174.
- 5) Rasmussen T.L., Thomsen E., Slubowska M.A., et al. Paleooceanographic evolution of the SW Svalbard margin (76°N) since 20,000 14C yr BP // *Quaternary Research*. 2007. V. 67. P. 100–114.

ПАЛЕОЭКОЛОГИЯ ДИАТОМЕЙ И ПАЛЕООКЕАНОЛОГИЯ ГОЛОЦЕНА ЛОФОТЕНСКОЙ КОТЛОВИНЫ НОРВЕЖСКОГО МОРЯ

Мельникова А.А., Казарина Г.Х., Чеховская М.П., Киреенко Л.А., Новичкова Е.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Лофотенская котловина, Норвежское море, диатомей, голоцен, палеоэкология, палеоокеанология.

Лофотенская котловина находится в центральной части Норвежского моря, которое в свою очередь граничит с Северным Ледовитым и Атлантическим океанами. За счет теплого течения Гольфстрим, оно обладает более мягким климатом. В своей работе А.В. Дриц отмечает: «Лофотенская котловина служит основным тепловым резервуаром субарктических морей и одновременно энергоактивной зоной, которая напрямую влияет на климат Европы и дальнейшее поступление Атлантической воды в Баренцево море и пролив Фрама» [1].

Для исследования палеоокеанологических изменений в распределении атлантических и арктических вод применяется, среди разных методов, анализ ископаемых комплексов диатомей. Он дает важную информацию при палеоэкологических, палеоклиматических и палеогеографических реконструкциях, а также при выявлении перестроек в экосистемах, т.к. диатомовые водоросли являются хорошими индикаторами параметров окружающей среды (температура, соленость воды, глубина бассейна и др.) [2].

Целью данной работы является изучение ископаемых комплексов диатомей для реконструкции палеоэкологических условий и установление палеоокеанологических характеристик во время формирования голоценовых отложений Лофотенской котловины Норвежского моря.

Колонка АМК-6142 (69°02.674' с.ш., 02°06.611' з.д.; глубина моря 3181 м) получена мультикорерным пробоотборником в 75-ом рейсе «Академик Мстислав Келдыш» 2019 г. в южной части абиссальной равнины Лофотенской котловины Норвежского моря. По разрезу колонки мощностью 26 см послойно через каждый 1 см отобрано 26 проб. Навеска 1 грамм сухого осадка каждой пробы была проварена в небольшом объеме 37% перекиси водорода, и остаток пропущен через сито с ячейками 20 мкм. Из полученной суспензии были приготовлены постоянные препараты, изученные под микроскопом проходящего света «Leica» при увеличении более $\times 1000$.

Ранее выполненный анализ состава планктонных и бентосных фораминифер исследуемых отложений показал уменьшение их численности в интервале разреза 18–9 см, вероятно, в связи с похолоданием и уменьшением продуктивности вод. Исчезновение и снижение концентрации субполярных и умеренных видов *Turborotalita quinqueloba*, *Neogloboquadrina pachyderma* (dex), *Globigerina bulloides* и *Globigerinita glutinata* в данном интервале, вероятно, обусловлены слабым влиянием Атлантических вод и более близким положением Арктического фронта, что привело к изменениям водных масс. А также были отобраны образцы фораминифер на установления возраста по радиоуглеродному методу. По полученным результатам, возраст колонки составляет 6638 лет.

Экспресс-анализ ископаемых диатомей по разрезу колонки выявил существенные изменения в их количественном содержании и видовом составе. В верхнем интервале (0–4 см) численность диатомей достигает высоких значений, до 453555 экз./г в образце 1–2 см. В составе комплексов преобладают морские, относительно тепловодные, планктонные формы: *Coscinodiscus radiatus* в количестве 90711 экз./г, *Rhizosolenia styliformis* 58962 экз./г, *Coscinodiscus marginatus* 60474 экз./г, *Thalassiotrix* sp. 10582 экз./г, единично встречены *Hemidiscus cuneiformis*, *Shionodiscus oestrupii*. Вероятно, в это время район исследования находился под заметным влиянием Атлантических вод. Ниже по разрезу (5–9 см) численность диатомей резко сокращается до 130977 экз./г в образце 6–7 см, в их составе появляются морские, планктонные и холодноводные: *Thalassiosira antarctica* 10619

экз./г, *Thalassiosira angusta-lineata* 15929 экз./г и створки *Coscino-discus radiatus* становятся более мелкими, что, по-видимому, свидетельствует о приближении к району исследования Арктического фронта. В интервале 9–18 см вплоть до низа колонки (образец 25–26 см) диатомей единичны и среди них отмечены переотложенные створки *Stephanorixis* sp., *Hemiaulus* sp. Эпизодически диатомей в заметных количествах отмечаются в образцах 11–12 и 15–16 см. В дальнейшем предполагается продолжить изучение диатомей данного разреза и получить более детальные характеристики палеоэкологических и палеоокеанологических условий исследуемого района в голоцене.

Авторы благодарят М.Д. Кравчишину, А.А. Клювиткина и А.Г. Матуля за предоставленные пробы осадков и помощь в проведении микропалеонтологических исследований.

Подготовка, обработка проб и микропалеонтологический анализ выполнен по проекту РНФ № 21-17-00235 при дополнительной поддержке в рамках Государственного задания ИО РАН по теме № 0149-2019-0007 (проведение экспедиций).

Список литературы

- 1) Дриц А.В., Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Карманов В.А., Новигатский А.Н. Потоки осадочного вещества в Лофотенской котловине Норвежского моря: сезонная динамика и роль зоопланктона // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 4. С. 576–594.
- 2) Стрельникова Н.И., Гладенков А.Ю. Диатомовые водоросли и их использование в стратиграфических и палеогеографических исследованиях // *Вопросы современной альгологии*. 2019. № 2 (20). С. 1–38.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ ПО ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Меренкова С.И.¹, Малахова Л.В.², Иванов В.Е.³, Малахова Т.В.²,
Бобко Н.И.², Капранов С.В.²

¹Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

³ООО "Севастопольский институт геодинамики и инженерно-технических изысканий", г. Севастополь

Ключевые слова: голоцен, петрогенные и рассеянные элементы, реконструкция палеоклимата, Севастопольская бухта.

Осадконакопление Севастопольской бухты напрямую связано с историей развития Черноморского бассейна, его трансгрессивных/регрессивных этапов, а также региональных и глобальных климатических изменений. Геохимические особенности осадков дотехногенного этапа, помимо непосредственно представления о химическом составе отложений, содержания и особенности распределения элементов могут дать информацию о палеогеографических изменениях, происходивших в среднем-позднем голоцене на данной территории.

Материалы получены в результате бурения в 2013 г. с понтона в акватории Севастопольской бухты. Скважина (№ 6) пробурена на расстоянии 240 м от причала, в точке с координатами 44°37'17.68" с.ш., 33°33'10.13" в.д. и глубиной от поверхности воды 17 м. Определение концентраций элементов проводили на базе НОЦКП «Спектрометрия и Хроматография» ФИЦ ИнБЮМ методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на масс-спектрометре PlasmaQuant MS Elite (Analytik Jena AG, Германия), Hg – атомно-абсорбционным методом «холодного пара» на анализаторе ртути «Юлия-2» (Россия). Были определены: петрогенные (Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Mn, Fe) и рассеянные (F, Be, S, B, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th, U), включая РЗЭ (Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu).

Полученные количественные данные по содержанию элементов рассматривались как по отдельности, в качестве индикаторов, так и в совокупности, для установления связей и зависимостей. На основании геохимического опробования четвертичных осадков Севастопольской бухты дотехногенного этапа были установлены следующие особенности.

Характерно аномальное обогащение осадков Ag (1,4-295,5 раз), Au (1,6-21,7 раз), Hg (до 64 раз), Pb (до 19 раз) относительно как кокколитового черноморского ила (кларки 0,23, 0,007, 0,06, 7,0 г/т соответственно) [1]), так и кларка для глин и глинистых сланцев (0,15, 0,005, 0,07, 14,0 г/т соответственно [2]. Повышенные содержания в отдельных пробах Cu, Zn, Pb, Cd, Sn, Sb, Hg, Ag, Au, по-видимому, обусловлены сульфидной минерализацией в области денудации, а также возникновением специфических геохимических барьеров (гидродинамического и, возможно, солевого) в периоды смены палеогеографических обстановок.

Значения отношений элементов, чувствительных к смене типа выветривания, позволяют установить черты климата в области денудации. Так, во время накопления толщи лагунно-лиманных отложений (заторфованные илы с остатками древесины), происходило относительное потепление и гумидизация, при этом пограничные слои толщи (переход к подстилающим и перекрывающим отложениям) фиксируют более сухие и холодные условия в самом начале и завершении ее формирования. Этап накопления терригенных морских илов начинается с потепления, но далее отмечается похолодание и аридизация. Пики относительного повышения солености согласуются с несколькими выше установленными периодами аридизации. Эти построения вписываются в общую региональную картину изменения климата юго-западного Крыма [3].

Работа выполнена в рамках тем государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН" «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (121031500515-8) и «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (121030300149-0), а также государственного задания FMWE-2021-0006 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Список литературы

- 1) Батурин Г.Н. Геохимия микроэлементов в углеродистых осадках современных морей и океанов // Геохимия. 2017. № 5. С. 402–412.
- 2) Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2009. 382 с.
- 3) Cordova С.Е., Lehman P.H. Holocene environmental change in southwestern Crimea (Ukraine) in pollen and soil records // The Holocene. 2005. Vol. 15, N 2. P. 263–277.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА РАССЕЯННОГО ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА В НОРВЕЖСКО-ГРЕНЛАНДСКОМ БАССЕЙНЕ

Мигдисова И.А., Стародымова Д.П., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н., Булохов А.В.

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: рассеянное осадочное вещество, взвесь, потоки, элементный состав, геохимия океана, седиментация.

Современные седиментационные системы океана являются интереснейшими объектами для исследования из-за их тесной взаимосвязи с гидрологическими и биогеохимическими процессами. Происходящие в настоящее время климатические изменения приводят к трансформации интенсивности седиментационных процессов, а также химического состава осадочного вещества. Выделяется несколько источников поступления осадочного вещества в открытый океан – начиная от материала, переносимого течениями, продуктов эолового и ледово-айсбергового переноса, заканчивая деятельностью гидротермальных источников и развитием локальных биогенных систем [1].

Целью работы стало изучение изменчивости элементного состава осадочного вещества в двух разных геодинамических обстановках в ходе процессов седиментогенеза. Для выявления природы взвеси в толще воды был выполнен ряд исследований: оценены потоки вещества с разными вариантами изменчивости (сезонной – по месяцам в течение года, вертикальной – на разных глубинах водной толщи); определен компонентный состав материала; изучен микроэлементный состав осадочного вещества.

В работе представлены результаты исследования осадочного вещества Норвежско-Гренландского бассейна двух районов: в Лофотенской котловине и на сочленении хребтов Мона и Книповича. Материал отбирался с помощью автоматических глубоководных седиментационных обсерваторий (АГОС), установленных в 2018 и 2019 годах в ходе рейсов НИС «Академик Мстислав Келдыш». В комплектацию АГОС входили седиментационные ловушки двух типов: ловушки с поворотным механизмом «Лотос», использующиеся для оценки сезонной изменчивости вещества, установленные в подповерхностном и придонном горизонтах, а также интегральные ловушки «МСЛ», позволяющие оценить изменчивость вещества по глубине, расположенные в промежуточных слоях водной толщи [2].

Микроэлементный анализ осаждающихся частиц был выполнен методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой после разложения вещества смесью концентрированных кислот. Содержание общего и органического углерода измеряли методом прямого определения концентрации общего углерода. Органический углерод определяли измерением после подкисления пробы 1н HCl, содержание неорганического карбонатного углерода рассчитывали по разнице $C_{\text{общ}}$ и $C_{\text{орг}}$. Содержания Si и Al были определены фотометрическим методом.

Как в Лофотенской котловине, так и в районе хребта Мона наблюдается проявление вертикальной зональности, выражающееся в увеличении потоков вниз по глубине: в придонном слое (2980 и 2770 м) поток значительно превышает значения потоков в промежуточных горизонтах (327 и 244 мг/м²/сут соответственно), что говорит о деятельности придонных течений и существовании нефелоидного слоя [2]. В районе хребта Мона в подповерхностном горизонте (500 м) наблюдается локальный максимум потока (89 мг/м²/сут), что отражает поступление осадочного вещества преимущественно биогенного происхождения из деятельного слоя. Сезонная изменчивость в подповерхностном и придонном слоях имеет как схожие закономерности – максимумы потоков в теплое время года (июнь–июль), что связано с циклом цветения водорослей кокколи-тофторид, так и различия – минимум потоков в поверхностном горизонте в ранневесенние месяцы

и резкое увеличение потоков в этот период в придонных горизонтах, что связано с усилением действий придонных течений.

Распределение компонентов взвеси водной толщи в районе хребта Мона практически идентично распределению компонентов на станции, расположенной в Лофотенской котловине – вниз по профилю водной толщи равномерно возрастает доля литогенного вещества, уменьшается доля органического и карбонатного вещества. Осадочное вещество подповерхностного горизонта содержит значительно больше биогенного вещества по сравнению с глубинными горизонтами, особенно хорошо это прослеживается на станции в районе хребта Мона.

Чтобы определить источники поступления вещества, были вычислены коэффициенты обогащения по формуле: $KO = (Эл/Al)_{\text{проба}} / (Эл/Al)_{\text{з.к.}}$, где $(Эл/Al)$ – это отношение содержания элемента к алюминию в пробе и в верхней части континентальной земной коры соответственно. Значения $KO > 3$ свидетельствуют о дополнительном источнике поступления элемента, отличном от литогенного [3].

По рассчитанным значениям КО был сделан вывод, что элементный состав осадочного вещества в двух обстановках имеет общие закономерности. Верхний горизонт обогащен относительно среднего состава земной коры рядом элементов: Zn, Sr, As, Cd, Ba. Вещество придонного горизонта обогащено Mn, Sr, Zn, As, Cd. На промежуточных горизонтах выявлено обогащение Mn, Pb и Eu. Было показано [4], что обогащение европием в отсутствие обогащения другими РЗЭ характерно для гидротермальных растворов.

В подповерхностном слое наблюдается локальное увеличение содержаний Ba в зимние месяцы – прослеживается совпадение с повышением содержания органики в этот же период. Была рассчитана доля избыточного бария по формуле $Ba_{\text{изб}} = Ba_{\text{общ}} - (Al_{\text{общ}}(Ba/Al)_{\text{з.к.}})$ [5]. Получили, что в подповерхностных горизонтах как в Лофотенской котловине, так и на хребте Мона доля $Ba_{\text{изб}}$ варьирует от 73% (минимум в мае) до 96–98% (максимум в период с декабря по февраль), что свидетельствует об активном процессе образования аутигенного (предположительно биогенного) барита in-situ в насыщенных барием микросредах в верхних слоях водной толщи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 20-17-00157).

Список литературы

- 1) Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. М.: Наука. - 1978. - 392 с.
- 2) Лукашин В.Н. Нефелоидный слой и горизонтальные потоки осадочного вещества в Норвежском море / В.Н. Лукашин, А.Д. Щербинин // Океанология. - 2007. - Т. 47, № 6. - С. 894-908.
- 3) Rudnick R.L. Composition of the continental crust / R.L. Rudnick, S. Gao // Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier. - 2003. - V. 3. - P. 1-63.
- 4) Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука. - 2006. - 360 с.
- 5) Леин А.Ю. Геохимический цикл бария в океане / А.Ю. Леин, М.Д. Кравчишина // Литология и полезные ископаемые. - 2021. - № 4. - С. 293-310.

ГЛОБАЛЬНЫЕ ОЛЕДЕНЕНИЯ И ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ РУДОГЕНЕЗ В ПРЕДЕЛАХ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА.

ЕСТЬ ЛИ ВЗАИМОСВЯЗЬ?

Мусатов А.Е.

ООО "Удоканская медь", пос. Новая Чара

Ключевые слова: Срединно-Атлантический хребет, современная гидротермальная активность, глобальные оледенения, формирование сульфидных руд на дне океана.

Гипотеза о связи глобальных оледенений и современной гидротермальной активности на морском дне в последнее десятилетие активно развивается. На данный момент возможная связь продемонстрирована рядом авторов на примере металлоносных осадков вблизи гидротермальных полей в пределах Восточно-Тихоокеанского поднятия, Срединно-Атлантического хребта (САХ) и хребта Карлсберг [1-3]. Также была предложена гипотеза о влиянии глобальных оледенений на зарождение гидротермальной активности по результатам изучения предполагаемого начала формирования сульфидных руд в пределах гидротермальных полей САХ и крупнейших ледниковых периодов в позднем плейстоцене [1]. Гипотеза о связи глобальных оледенений и гидротермальной активности предполагает, что уменьшение давления на морское дно в следствии изменения уровня моря в периоды глобальных оледенений может приводить к активизации гидротермальной деятельности [1,2]. Данное предположение косвенно подтверждается совпадением пиков гидротермальной активности, выделенные по металлоносным осадкам, с двумя последними эпохами оледенения. По результатам изучения связи между зарождением гидротермальной активности в пределах САХ и оледенений предположено, что данная связь характерна для магматических сегментов рифтовых зон САХ [4].

Для проверки данного предположения были выбраны руды гидротермальных полей Зенит-Виктория и Юбилейное, расположенные в пределах магматического сегмента рифтовой зоны САХ, ограниченного нетрансформными смещениями на участках $20^{\circ}30'$ и $19^{\circ}47'$ с.ш. Данный сегмент характеризуется площадным магматизмом, проявленным в образовании крупных осевых вулканических поднятий и вулкана Пюи-де-Фолль [5]. Гидротермальные поля связаны с базальтами и симметрично расположены на противоположных бортах рифтовой долины в привершинной части склонов на менее крутопадающих участках. Поле Зенит-Виктория находится на восточном, а поле Юбилейное - на западном склоне рифтовой долины. Оба поля состоят из 3-х рудных тел.

Сульфидные руды поля Зенит-Виктория и поля Юбилейное подразделяются на три минеральных типа: марказит-пиритовый, пирит-халькопиритовый и сфалерит-пирит-марказитовый. Руды марказит-пиритового типа сложены преимущественно минеральными агрегатами пирита, которые формируют массивные слабо пористые руды, руды пирит-халькопиритового типа представлены фрагментами двузональных труб, в которых внутренняя часть сложена преимущественно халькопиритом, а внешняя пиритом. Сфалерит-пирит-марказитовые руды сложены сильно опалитизированными массивными рудами, в которых сохранились реликты полихет. По химическому составу также наблюдается разница в типах руды.

При сравнении минерального и химического состава руд двух полей и их возрастных характеристик по данным [6] выделено 2 главных этапа развития рудогенеза. На первом этапе (Зенит-Виктория $\approx 60-20$ тыс.л.н.; Юбилейное $\approx 100-20$ тыс.л.н.) формировались руды марказит-пиритового типа. На втором этапе ($\approx 20-1$ тыс.л.н.) начали формироваться пирит-халькопиритовые руды и сфалерит-пирит-марказитовые, а также продолжили образовываться марказит-пиритовые руды. Начало второго этапа ≈ 20 тыс.л.н. и начало формирования пирит-халькопиритовых руд примерно совпадает с последним гляциальным максимумом ($\approx 20-18$ тыс.л.н.). Для сравнения также

рассмотрено поле Пью-де-Фолль, расположенное на поверхности вулкана. По имеющимся датировкам начало формирования поля около 20 тыс. л.н. [6]. Начало формирования руд поля Пью-де-Фолль и второго этапа рудообразования полей Зенит-Виктория и Юбилейное попадает в один временной интервал, и их образование связано с магматической активностью. Предполагается, что во время последнего ледникового максимума происходило уменьшение уровня моря, что в свою очередь привело к магматической активности и последующей гидротермальной деятельности, которая была проявлена в синхронном начале образования высокотемпературных руд поля Пью-де-Фолль и формирования нового этапа рудообразованию в пределах полей Зенит-Виктория и Юбилейное.

Список литературы

- 1) Lund D.C., Asimow P.D., Farley K.A. et al. Enhanced hydrothermal activity along the East Pacific Rise during the last two glacial terminations // *Science*. 2016. V. 351. Is. 6272. P.478-482.
- 2) Middleton J.L, Langmuir C.H., Sujoy Mukhopadhyay S. et al. Hydrothermal iron flux variability following rapid sea level changes // *Geoph. Res. Letters*. V. 43. 2016. P. 3848–3856.
- 3) Qiu Z., Fan W., Han X. et al. Distribution, speciation and mobility of metals in sediments of the Tianxiu hydrothermal field, Carlsberg Ridge, Northwest Indian Ocean. *Journal of Marine Systems*. V. 237. 2023-1. P. 103826
- 4) Мусатов А.Е., Черкашев Г.А. Влияния глобальных оледенений на зарождение гидротермальной активности в пределах Срединно-Атлантического хребта // *Океанология*. 2020. Т. 60, № 3, С. 466-473.
- 5) Порошина И.М., Черкашев Г.А. Морфотектоническое строение и сегментация северной при-экваториальной части Срединно-Атлантического хребта (Российский Разведочный Район). *Мировой океан. Том III. Твердые полезные ископаемые и газовые гидраты в океане. Под ред. Лобковского Л.И., Черкашева Г.А. М.: Научный мир, 2018. С. 60–75.*
- 6) Cherkashov G., Kuznetsov V., Kuksa K. et al. Sulfide geochronology along the Northern Equatorial Mid-Atlantic Ridge // *Ore Geology Reviews*. 2017. V. 87. P. 147–154.

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ЛИТОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСАДКОВ САМБИЙСКО-КУРШСКОГО ПЛАТО (ЮГО-ВОСТОЧНАЯ БАЛТИКА)

Наумов И.А., Дорохова Е.В.

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

²Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: гранулометрия, геохимия, рентгено-флуоресцентный анализ, тяжелые минералы, тяжелые металлы, Юго-Восточная Балтика.

Гранулометрический и элементный составы донных осадков являются одними из ключевых литологических характеристик, изучение которых актуально в связи с установлением источников поступления осадочного материала, его дифференциацией, путями распространения, выявлением антропогенного воздействия. Появление новых экспресс-методов определения химического состава (портативные рентгено-флуоресцентные анализаторы) способствует изучению большого количества образцов за короткое время и использованию полученных результатов для литологических исследований.

Подводный береговой склон северного побережья Самбийского полуострова и Куршской косы охватывает Самбийско-Куршское плато до глубин современного волнового воздействия (30 м) и характеризуется высокой изменчивостью поверхностных осадков. Согласно карте распределения поверхностных осадков [1], юго-западная часть плато - грубозернистые отложения, маркирующие выходы коренных пород. Центральная часть и плато Рыбачий на севере характеризуются песками с гравием и галькой, образовавшихся в результате размыва позднечетвертичных моренных отложений. Вдоль побережья Куршской косы и севернее плато Рыбачий распространены средне- и мелкозернистые пески, образовавшиеся в ходе современной и древней волновой аккумуляции. Район исследования отличается высокой антропогенной нагрузкой, что отражается в увеличенном содержании тяжелых металлов в прибрежных осадках [2].

Цель работы – изучить гранулометрический и химический составы поверхностных осадков Самбийско-Куршского плато, выявить взаимосвязь между этими характеристиками, установить пространственные закономерности распределения химических элементов. Материал для исследования (143 образца поверхностных осадков) был собран в 48-ом и 49-ом рейсах НИС «Академик Борис Петров». Гранулометрический анализ выполнялся на вибрационном грохоте с применением набора сит с размерами ячеек в логарифмической шкале. Статистические параметры гранулометрических распределений (средний размер и сортировка) рассчитывались методами К.Л. Фолка и В.Ц. Варда в программе GRADISTAT [3]. Химический состав образцов изучался при помощи портативного рентгено-флуоресцентного анализатора Olympus-Vanta-C. Анализ результатов проводился на основе корреляционной матрицы, рассчитанной для всех данных, парных диаграмм концентраций элементов и гранулометрических параметров, а также схем их пространственных распределений.

По результатам работы выявлено, что средний размер измеренных образцов варьирует от 0,04 мм до 20 мм, что соответствует различным типам осадка от крупных алевритов до мелкой гальки. Коэффициент сортировки варьирует от 1,25 (очень хорошо сортированные отложения) до 7,72 (очень плохо сортированные отложения). Около половины проб характеризуется значениями коэффициента сортировки от 1,29 до 1,62 и средним размером 0,25 мм – 1 мм, указывающим на преобладание песков с хорошей и умеренно хорошей степенью сортировки. Между средним размером и сортировкой прослеживается корреляция (коэффициент корреляции, $r = 0,3$), однако взаимосвязь между этими параметрами нелинейная. Наилучшей сортировкой обладают пески от мелко- до крупнозернистых. Как с уменьшением, так и с увеличением среднего размера сортировка ухуд-

шается, что свидетельствует о вкладе различных источников и процессов осадконакопления в формирование поверхностных осадков.

На основе корреляционной матрицы установлены пары химических элементов, значения концентраций которых характеризуются наиболее сильной корреляцией ($r > 0,80$): Fe и As (0,92), Ti и Zr (0,92), Ti и Y (0,91), Zr и Y (0,91), K и Rb (0,86), Fe и Zn (0,80). Это обусловлено как минеральным составом поверхностных осадков, так и общими источниками поступления осадочного вещества. Выявлено, что титан, цирконий и иттрий имеют максимальную взаимосвязь. Основной причиной их высокой корреляции является то, что они входят в состав тяжелых минералов, распространенных в песчаных осадках прибрежной зоны Куршской косы. Распространение аутигенных железо-марганцевых корок и конкреций объясняет взаимосвязь железа и марганца (0,76) в связи с их высоким содержанием в осадках. Алюминий коррелирует с калием (0,79), рубидием, барием, что, вероятно, объясняется минералогическим составом осадков.

Наибольшая взаимосвязь между средним размером и содержанием элементов установлена для Si, Ca и Sr. Кремний демонстрирует отрицательную корреляцию с размером осадка (-0,5). Его наибольшие содержания зафиксированы в тонко- и среднезернистых песках, характеризующихся преобладанием кварца [4]. Ca и Sr имеют высокую взаимосвязь (0,8), что обусловлено их биогенным происхождением. Прямая корреляция со средним размером осадка (0,6) вероятно объясняется наличием раковинного детрита в крупнозернистых отложениях.

Из особенностей пространственного распределения химических элементов необходимо отметить Ti, Y и Zr, максимальные содержания которых зафиксированы у побережья Куршской косы в районе п. Морское, что свидетельствует о локальном источнике тяжелых минералов в этом районе. Содержание токсичных тяжелых металлов (Pb, Zn, Cd) относительно низкое и не превышает 41, 91 и 47 ppm, соответственно. Взаимосвязи между тяжелыми металлами и гранулометрическим составом не выявлено, однако согласно схемам распределения этих элементов, максимальные концентрации - в районах распространения мелко- и среднезернистых песков.

Получены новые данные о литологии поверхностных осадков Самбийско-Куршского плато. Они представлены в основном хорошо сортированными кварцевыми песками различной зернистости. Геохимические показатели отражают минералогический состав отложений.

Исследование выполнено в рамках госзадания ИО РАН (тема №FMWE-2021-0012).

Список литературы

- 1) Жамойда В.А. и др. Литологическая карта поверхности морского дна. Масштаб 1:700 000 // Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря. Ред. О.В. Петров, М.А. Спиридонов. Санкт-Петербург: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2010. С. 60-63.
- 2) Krek A., Krechik V., Danchenkov A., Krek E. Pollution of the sediments of the coastal zone of the Sambia Peninsula and the Curonian Spit (Southeastern Baltic Sea) // PeerJ. 2018. 6:e4770
- 3) Blott S.J., Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments // Earth Surface Processes and Landforms, 2001. V. 26, P. 1237–1248.
- 4) Геология Балтийского моря / Под ред. В.К. Гуделиса, Е.М. Емельянова. Вильнюс: Мокслас, 1976. 380 с.

ГЕОХИМИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ДОННЫХ ОСАДКОВ ЧАУНСКОЙ ГУБЫ (ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ МОРЕ)

Полтавская Н.А.¹, Гершелис Е.В.¹, Гринько А.А.¹, Чаркин А.Н.², Ярощук Е.И.²,
Гусева Н.В.¹, Семилетов И.П.^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск.

²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток.

Ключевые слова: органический углерод, донные осадки, пиролиз, молекулярный анализ, гранулометрический анализ, Чаунская губа, Восточно-Сибирское море, Арктика.

Восточно-Сибирское море (ВСМ) является самым ледовитым и наименее изученным морем среди арктических морей. Для ВСМ характерны особые биогеохимические условия, где с западной стороны наблюдается активное влияние речного стока и продуктов береговой эрозии (западная биогеохимическая провинция – ЗБП), с восточной стороны – приток высокопродуктивных тихоокеанских вод (восточная биогеохимическая провинция – ВПБ) [1]. Наше исследование сфокусировано на Чаунской губе – полузамкнутой аккумулятивной акватории, граничащей как с ВБП, так и ЗПБ Восточно-Сибирского моря. Это позволит нам оценить региональные геохимические особенности транспорта и преобразования органического вещества (ОВ) в различных седиментационных и биогеохимических обстановках, действующих на Восточно-Сибирском арктическом шельфе. Для Чаунской губы характерно ограниченное влияние речного стока и, по имеющимся данным, отсутствует субаквальная мерзлота, а термоабразия берегов носит зональный характер [2-4].

В данной работе мы проанализировали 25 проб донных осадков, отобранных по профилю от прибрежной зоны Чаунской губы до внутренней части шельфа ВСМ в ходе комплексной научно-исследовательской экспедиции на НИС «Академик Опарин» в 2020 году. Для характеристики состава и источников органического углерода мы использовали данные пиролиза Rock-Eval и молекулярные маркеры (n-алканы). Также был установлен гранулометрический состав с целью оценки условий седиментации, действующих в исследуемом районе. Анализ выполнялся на лазерном анализаторе частиц Analysette 22 NanoTec (Fritsch, Германия). Размерная типизация осадков проводилась на основе трехкомпонентной классификации «песок-алеврит-глина», основанной на работе Ф. Шепарда [5].

По результатам проведенных исследований осадочный материал Чаунской губы состоял из пелитового алеврита (43,5%), алеврита (34,63%), пелита (11,13%) и песка (10,73%). По данным пиролитического анализа общее содержание органического углерода Сорг составило от 0,49 до 1,76%. Значения водородного индекса HI находились в пределах от 111 до 188 УВ/г Сорг, кислородного индекса OI от 134 до 238 мгСО₂/г Сорг. Хромато-масс-спектрометрический анализ показал повышенное значение высокомолекулярных гомологов нечетных n-алканов – n-C₂₅, n-C₂₇, n-C₂₉, n-C₃₁. Это свидетельствует в пользу преобладания терригенного ОВ в составе донных осадков. Соотношение высокомолекулярных n-алканов к низкомолекулярным (НМВ/ЛМВ) составило от 8,02 до 49,26, подтверждая преобладание наземного ОВ. В то время как для губы Буор-Хая, где идет прямое влияние стока р. Лена, отношение НМВ/ЛМВ на 38% выше полученных нами значений для Чаунской губы [6]. Индекс СРІ₂₅₋₃₃ менялся от 1,47 до 4, что говорит о преобладании уже окисленного, разложившегося ОВ (СРІ ближе к 1). Однако, не исключается и наличие в более малых концентрациях свежесинтезированного ОВ (СРІ выше 5). Полученные нами значения СРІ₂₅₋₃₃ в 2 раза меньше значений для губы Буор-Хая, что можно связать с отсутствием крупного речного стока в Чаунской губе. Полученные результаты соотношения Рг/Ph – 0,6-1,59 указывают на восстановительную и субокислительную среду осадконакопления в районе исследования.

Таким образом, основной состав донных осадков Чаунской губы формируется гравитационным осаждением глинистых частиц в стабильных подледных условиях, формирующих области пелитовых осадков в центральной части губы, гравитационными потоками поступающего терригенного материала вследствие термоабразии береговой зоны со стороны о. Айон, а также речным аллювием в юго-восточной части губы. Данные пиролиза Rock Eval, а также анализ распределения n-алканов для поверхностных осадков указывают на смешанный генезис ОВ с доминирующим вкладом наземного ОВ высокой степени преобразованности. Тем не менее, сопоставление ряда молекулярных индексов (НМW/LMW, CPI), полученных для осадков Чаунской губы (ВБП) и губы Буор-Хая (ЗБП) [6], свидетельствуют о сравнительно менее активном вкладе терригенного материала в структуру ОВ Чаунской губы, предполагая наличие постоянного источника автохтонной продукции под прямым влиянием Чаунских высокопродуктивных вод.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема №FSWW-2023-0010).

Список литературы

- 1) The East Siberian Sea as a transition zone between Pacific-derived waters and Arctic shelf waters / Semiletov I., Dudarev O., Luchin V., Charkin A., Shin K.H., Tanaka N. // *Geophysical Research Letters*. – 2005. – V. 32. – P. 1–5.
- 2) Дударев О.В. Современный литоморфогенез на Восточно-Арктическом шельфе России: автореф. диссертации кандидата геолого-минералогических наук. – Владивосток, 2016.
- 3) Патык-Кара Н.Г., Иванова А.М. Геохимические поиски месторождений твердых полезных ископаемых на континентальном шельфе. М.: Научный мир. – 2003. – 415 с.
- 4) Гресов А.И. Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока России и перспективы ее промышленного освоения / А.И. Гресов // *Углеметановые бассейны Республики Саха (Якутия) и Северо-Востока*. – Т. II. – 2012. – Владивосток: Дальнаука. – 468 с.
- 5) Nomenclature based on sand-silt-clay ratios / Shepard F.P. // *Journal of Sedimentary Petrology*. – 1954. – V.24. – P. 151-158.
- 6) Composition of Sedimentary Organic Matter across the Laptev Sea Shelf: Evidences from Rock-Eval Parameters and Molecular Indicators / Gershelis E., Grinko A., Oberemok I., Klevantseva E., Poltavskaya N., Ruban A., Chernykh D., Leonov A., Guseva N., Semiletov I. // *Water*. – 2020, – V. 12. – P. 3511 12, 3511. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/12/3511> (accessed 14 December 2020).

УСЛОВИЯ СЕДИМЕНТАЦИИ В ГОТЛАНДСКОМ БАССЕЙНЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ

Пономаренко Е.П.¹, Пугачёва Т.Л.^{1,2}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

Ключевые слова: литориновая стадия, заливы североморских вод, североатлантическое колебание.

По данным комплексного анализа двух разрезов донных отложений, отобранных в Готландской впадине с помощью ударной геологической трубы, были реконструированы палеоокеанологические условия в Балтийском море в позднем голоцене. Разрез АБП-44035 (404 см) получен на южном склоне Восточного Готландского бассейна на глубине 117 м, разрез АИ-56032 (404 см) — в центральной части бассейна на глубине 159 м. Для оценки общего содержания органического вещества в осадках использован показатель потерь при прокаливании (ППП), а также проведено определение содержания органического углерода (Сорг) (анализатор АН-7529М). Содержание химических элементов изучено методом рентгенофлуоресцентного анализа (спектрометр Vanta-C OLYMPUS и система Geotek MSCL-XYZ). Концентрация Mn и отношение Fe/Mn использованы в качестве показателей изменения окислительно-восстановительных условий [1]; соотношение Zr/Rb — показатель содержания грубой фракции в осадках; концентрация Br, а также бентосных фораминифер (БФ) — оценка изменения солёности вод. Возрастная модель разреза АБП-44035 построена по данным абсолютных AMS датировок. Стратиграфическое разделение разреза АИ-56032 основано на изменении литологических характеристик.

Колонка осадков АИ-56032 представлена коричневыми и серо-коричневыми глинами, сменяющимися вверх по разрезу оливковыми и коричневыми илами, характеризующимися наличием слоистых интервалов. Глинистая пачка характеризуется низким содержанием Br, низким соотношением Zr/Rb и Mn/Ti, а также низким показателем ППП и относительно стабильным соотношением Mn/Fe. Венчает пачку прослой голубоватых глин, характеризующийся резким увеличением содержания Br и Mn, а также повышением показателя Zr/Rb и Mn/Fe. В илистой пачке прослеживаются три интервала (вверх по разрезу): увеличения показателей ППП, Mn/Fe, Zr/Rb и содержания Br; снижения данных показателей; увеличения в подповерхностном слое. В колонке АБП-44035, представленной гомогенными оливково-серыми илами, можно выделить три интервала: повышения ППП и содержания Сорг на фоне низких концентраций БФ; уменьшения ППП и содержания Сорг и БФ; высоких концентраций БФ на фоне роста ППП и содержания Сорг.

Колонка центральной части бассейна охватывает все стадии развития Балтийского моря — от Балтийского Ледникового озера до пост-литориновой стадии; колонка южного склона сформирована в течение последних 7,1 тыс. кал.л. Характеристики осадков, накопленных во время ранних стадий развития водоема (16,0–8,5 тыс. кал.л.н.), соответствуют пресноводным спокойным условиям бассейнового осадконакопления на фоне низкой продуктивности поверхностных вод, ввиду более холодного климата. Низкий показатель Mn/Ti и стабильное соотношение Mn/Fe отражают кислородные условия. При переходе от Анцилового озера к литориновой стадии отмечено повышение солёности, а также интенсификация придонной динамики вод ввиду проникновения в котловину Балтийского моря солёных вод, повлиявших на развитие гипоксии в придонном слое. Потепление климата во время литориновой стадии повлияло на повышение продуктивности вод. Повторяющиеся бескислородные условия способствовали лучшей сохранности органики в осадках. Отсутствие слоистых интервалов в разрезе южного склона говорит о лучшей аэрации придонных вод ввиду меньшей глубины. Вышележащие осадки обоих разрезов соответствуют климатическому оптимуму голоцена (КОГ), повышение содержания органического вещества в осадках отра-

жает увеличение продуктивности. В центральной части бассейна данный период характеризуется продолжающимся ростом солености придонных вод. Преимущественно положительная фаза североатлантического колебания (САК) в данное время обусловила преобладание над регионом западных ветров, которые способствуют поступлению соленых вод в Балтийское море [2]. Слоистые отложения данного периода, отличающиеся высоким соотношением Mn/Fe, отражают периодическое ухудшение придонной вентиляции ввиду усилившейся стратификации вод. В то же время, данный интервал в осадках южного склона характеризуется низкими концентрациями БФ, являющихся индикаторами повышения солености, что может объясняться тем, что объема затокных вод было недостаточно для достижения более мелководных районов. Пост-литориновая стадия (последние 3,2 тыс. кал.л.н.) отличается изменчивостью параметров среды при переходе от более холодного климата после окончания КОГ к современным теплым условиям. В интервале 3.2–2.2 тыс. кал.л.н. (АБП-44035) и 60-15 см (АИ-56032) наблюдается общее понижение содержания органики, отражающее снижение первичной продукции в результате более холодного климата. В обоих разрезах в данном интервале накопились гомогенные осадки, характеризующиеся низкими показателями индикаторов затокных вод (БФ, Vg и Zr/Rb), соответствующие улучшению аэрации придонных вод, чему способствовало ослабление галоклина ввиду снижения придонной солености. Отрицательная фаза САК обусловила ослабление западных ветров и, как следствие, снижение интенсивности поступления соленых вод. Увеличение активности затокных вод после 2,2 тыс. кал.л.н. отражено в осадках южного склона и сопровождается стойким положительным режимом САК, в колонке центральной части относительный рост солености придонных вод отмечен выше 15 см. В самых верхних горизонтах всех исследованных разрезов отмечено повышение содержания органики в осадках, соответствующее увеличению продуктивности на фоне потепления климата. В разрезе южного склона (АБП-44035) данный период характеризуется снижением количества затокных вод, что соответствует отрицательной фазе САК, в то время как в колонках более глубоководной станции (АИ-56032) отмечается незначительное повышение солености.

Отбор материала и литологический анализ выполнены в рамках ГЗ (№ FMWE-2021-0012); геохимические и микропалеонтологические анализы выполнены за счет гранта РНФ № 22-17-00170.

Список литературы

- 1) Marsh R., Mills R.A., Green D.R.H., Salter I., Taylor S. Controls on sediment geochemistry in the Crozet region. *Deep Sea Res Part II*. 2007. 54. P. 2260–2274.
- 2) Trouet V., Esper J., Graham N.E., Baker A., Scourse J.D., Frank D.C. Persistent positive North Atlantic Oscillation mode dominated the medieval climate anomaly. *Science*. 2009. 324. P. 78–80.

УСЛОВИЯ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ

Пугачёва Т.Л.^{1,2}, Пономаренко Е.П.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

Ключевые слова: бентосные фораминиферы, потери при прокаливании, трубка Ниемисто, сортируемый сilt.

Условия в глубоководной части Балтийского моря сильно зависят от редких спорадических затоков североморских вод, обусловленных атмосферной циркуляцией над северной частью Атлантического океана, а также от усиливающейся антропогенной нагрузки. Целью данной работы является восстановление условий осадконакопления в течение последних 2000 лет, а также выявление различий данных условий, в том числе изменчивости затоков североморских вод, в разных бассейнах южной части Балтийского моря.

В исследовании использованы донные отложения (ДО), отобранные трубкой Ниемисто в 43-м и 44-м рейсах НИС «Академик Борис Петров» в Гданьском бассейне (АБП-43026, АБП-43035, АБП-43105), Арконской (АБП-44059) и Борнхольмской (АБП-44063) впадинах. Литологическое описание выполнено на борту судна, после чего керны были разобраны с шагом в 1 см. Верхние 5 см зафиксированы 80 % спиртовым раствором бенгальского розового для окрашивания живых фораминифер и использованы только для микропалеонтологического анализа. Нижележащие осадки были использованы для микропалеонтологического, гранулометрического и геохимического анализов, а также для определения потерь при прокаливании (ППП). В качестве основного маркера вод, соленостью более 12 епс, в микропалеонтологическом анализе были использованы бентосные фораминиферы (БФ), принадлежащие роду *Criboelphidium*. Ввиду плохой сохранности карбо-натных раковин БФ в ДО, концентрация определялась как соотношение количества внутренних органических оболочек БФ на 1 грамм промытого влажного осадка (р/г) [1,2]. Для оценки интенсивности придонных палеотечений выполнен гранулометрический анализ. В качестве показателей активности течений были использованы содержание и средний размер сортируемого силта (СС – терригенные осадки размерностью от 10 до 63 мкм; [3]). Датирование ДО было проведено двумя способами – методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS ¹⁴C), а также итеративным методом, основанным на сопоставлении пиков в распределении концентраций свинца в исследуемых разрезах с известными историческими повышениями концентраций, обусловленными деятельностью человека. [4]. Определение концентраций свинца проведено с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра (Vanta™, OLYMPUS). Для качественной оценки содержания органического вещества (ОВ) в ДО использовался метод определения ППП.

ДО всех колонок представлены оливковыми и темно-оливковыми пелитовыми илами, сменяющимися в нижних частях разрезов более плотными глинистыми илами. Возрастные модели всех колонок, построены на основе данных распределения свинца, за исключением колонки АБП-43105, для которой также использованы данные AMS ¹⁴C. Полученные возрастные модели охватывают последние 2000 лет, таким образом, осадки всех колонок относятся к постлиториновой фазе Балтийского моря, за исключением интервала серых глинистых илов (56–49 см) колонки АБП-43026, которые относятся к более ранней Анциловой фазе.

По результатам гранулометрического анализа выявлено, что во всех колонках, за исключением АБП-43026, а также верхней части разреза АБП-43105, показатели размера и содержания СС вдоль разреза изменяются, в общем, в пределах от 2 до 5 мкм и от 5 до 10% соответственно. В колонке АБП-43026 содержание СС увеличивается в верх по разрезу от 7 до 52%; размер СС в нижней части колонки (55–41 см) характеризуется пилообразным изменением от 16 до 36 мкм,

после чего, в верхней части разреза не превышает 40 мкм. В верхней части колонки (21–7 см) АБП-43105 содержание СС возрастает от 18 до 40%. Наибольшее содержание СС отмечено в колонках, отобранных в Арконской впадине (АБП-44059) и на Гданьско-Готландском пороге (АБП-43026) в Гданьском бассейне — до 60% и 52% соответственно. Повышенное содержание и размер СС указывает на более интенсивные гидродинамические условия в придонном слое в Арконском бассейне и на Гданьско-Готландском пороге, по сравнению с Борнхольмской и Гданьской (АБП-43035 и АБП-43105) впадинами.

Содержание ОВ изменяется мало и составляет, в среднем, 5% вдоль разрезов всех колонок. Исключение составляет колонка АБП-43026, в осадках которой ППП увеличивается вверх по разрезу от ~ 10 до 22%. Концентрации органики вдоль разрезов в Арконской и Борнхольмской впадинах ниже, чем в колонках, отобранных в Гданьском бассейне, и составляют от 15 до 20% в обоих разрезах. Эти отличия могут объясняться выносами ОВ в Гданьский бассейн со стоками крупных рек, таких как Неман или Висла.

В результате микропалеонтологического анализа выявлено, что содержание БФ в разрезах Гданьского бассейна низкое (до 5 р/г). В Арконской и Борнхольмской впадинах концентрации БФ в несколько раз выше (до 35 и 40 р/г соответственно), по сравнению с Гданьским бассейном, также можно отметить, что содержание БФ увеличивается вверх по разрезу. Повышенные концентрации БФ в Арконской и Борнхольмской впадинах указывают на постоянную соленость вод более 12 епс в придонном слое.

Таким образом, по результатам комплексного анализа ДО южной части Балтийского моря были выявлены пространственные различия условий осадконакопления между Гданьским бассейном, Арконской и Борнхольмской впадинами. Наиболее интенсивными гидродинамическими условиями характеризуются Арконская впадина и Гданьско-Готландский порог. Гданьский бассейн характеризуется большим содержанием ОВ в ДО, поступающего со стоком крупных рек. Более высокая соленость придонных вод в Арконской и Борнхольмской впадинах, по сравнению с Гданьским бассейном, объясняется близостью впадин к источнику заточков североморских вод — Датским проливом.

Экспедиционные исследования и литологическое описание выполнены за счет госзадания АО ИО РАН (тема № FMWE-2021-0012). Микропалеонтологический, гранулометрический и геохимический анализы проведены за счет средств гранта РНФ № 22-17-00170.

Список литературы

- 1) Brodniewicz I. Recent and some Holocene Foraminifera of the southern Baltic Sea // *Acta Palaeontologica Polonica*. – 1965. – Т. 10. – №. 2.
- 2) Binczewska A. et al. Changes in the inflow of saline water into the Bornholm Basin (SW Baltic Sea) during the past 7100 years—evidence from benthic foraminifera record // *Boreas*. – 2018. – V. 47. – №. 1. – P. 297-310
- 3) McCave I.N., Hall I.R. Size sorting in marine muds: Processes, pitfalls, and prospects for paleoflow-speed proxies // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2006. – V. 7. – №. 10.
- 4) Zillen L., Lenz C., Jilbert T. Stable lead (Pb) isotopes and concentrations – A useful independent dating tool for Baltic Sea sediments // *Quaternary Geochronology*. 2012. V. 8. P. 41–45.

ИСКОПАЕМЫЕ КОМПЛЕКСЫ БЕНТОСНЫХ ФОРАМИНИФЕР В ОСАДКАХ ТРАНСФОРМНОГО РАЗЛОМА ЧАРЛИ-ГИББС

Радзиня А.¹, Баширова Л.Д.^{1,2}, Кулешова Л.А.², Пономаренко Е.П.², Пугачёва Т.Л.^{1,2}

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: палеоокеанологические реконструкции, осадконакопление, Северная Атлантика, голоцен.

Район трансформного разлома Чарли-Гиббс характеризуется сложной гидродинамической обстановкой в придонном слое: здесь происходит водообмен между бассейнами восточной и западной частей Северной Атлантики, которые изолированы друг от друга сегментами Срединно-Атлантического хребта. Являясь естественным коридором глубинного водообмена, данная область Атлантического океана представляет интерес для палеоокеанологических исследований. Несмотря на ценные опубликованные сведения о придонной палеоциркуляции вод и особенностях осадконакопления в разломе Чарли-Гиббс [1,4,5], остается много неопределенностей, в частности в отношении распределения и свойств глубинных водных масс во время ледниковых интервалов, а также на границах климатических стадий. Важным источником информации об океанологической истории прошлого являются бентосные фораминиферы (БФ). С помощью микропалеонтологического анализа глубоководных сообществ БФ реконструируют такие параметры среды, как: интенсивность поступления органического вещества (ОВ) на дно, качество ОВ (свежее или измененное), содержание кислорода в придонных и поровых водах, интенсивность придонных течений, ледовые условия [3].

Цель настоящей работы - реконструкция придонных условий в районе трансформного разлома Чарли-Гиббс во время последнего ледниково-межледникового перехода по данным изучения комплексов БФ. В качестве материала исследования послужила колонка донных осадков АСВ-53-К1 (52°37.080' с.ш., 33°34.726' з.д., глубина моря 3851 м, длина 465 см), отобранная в северном канале разлома Чарли-Гиббс, на вершине канального контуритового дрифта, в 53 рейсе ПС «Академик Сергей Вавилов» (2021) [2]. На основе литологического описания полученных осадков, данных о содержании полярного вида планктонных фораминифер *Neogloboquadrina pachyderma (sin)* и результатов подсчета зерен ледового разноса выполнено стратиграфическое расчленение колонки. Предполагается, что осадки колонки были накоплены в течение позднего плейстоцена и голоцена. По резкому снижению процентного содержания раковин *N. pachyderma (sin)* и зерен ледового разноса, а также увеличению содержания карбоната кальция и органического углерода в осадках колонки АСВ-53-К1 был выбран интервал (260-330 см), соответствующий переходу от холодных ледниковых условий позднего плейстоцена к теплым межледниковым (ранний голоцен). В пределах данного интервала наблюдается изменение литологических характеристик осадков: песчаные глины (нередко с включениями гравия) сменяются на глины пелитовой и алевро-пелитовой фракций. В исследуемом интервале выделены экологические группы секреторно-известковых БФ, которые, главным образом, связаны с последовательной сменой условий региональной биопродуктивности (поступление ОВ на дно), а также с изменением содержания растворенного углекислого газа и бикарбонат-иона в придонных водах (агрессивность среды). Выявлены два доминирующих вида БФ: *Oridorsalis umbonatus* и *Melonis pompilioides*. Также к преобладающим по численности отнесены виды *Eggerella bradyi*, *Globocassidulina subglobosa* и *Pullenia quinqueloba*.

Экспедиционные исследования, определение содержания органического углерода и карбоната кальция в осадках проведены в рамках государственного задания ИО РАН (тема №FMWE-2021-0012). Микропалеонтологический анализ, обобщение и интерпретация данных выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант №22-17-00170).

Список литературы

- 1) Баширова Л.Д., Дорохова Е.В., Сивков В.В., Андерсен Н., Кулешова Л.А., Матуль А.Г. Палеотечения в районе разлома Чарли-Гиббс в позднечетвертичное время // *Океанология*. – 2017. – Т. 57. – №. 3. – С. 491–502.
- 2) Пономаренко Е.П., Баширова Л.Д., Пугачёва Т.Л. Условия осадконакопления в районе разлома Чарли-Гиббс в позднем плейстоцене–голоцене // Сборник статей по материалам всероссийской научной конференции (с международным участием) «Динамика экосистем в голоцене», Санкт-Петербург, 17–21 октября 2022 года / Отв. ред. Д.А. Субетто, – СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2022. – С. 125–128.
- 3) Gooday A.J. Benthic foraminifera (Protista) as tools in deep-water palaeoceanography: Environmental influences on faunal characteristics // *Advances in Marine Biology*. – 2003. – Vol. 46. – P. 1–90.
- 4) Kuijpers A., Troelstra S.R., Wisse M. et al. Norwegian Sea overflow variability and NE Atlantic surface hydrography during the past 150,000 years // *Marine Geology*. – 1998. – Vol. 152. – P. 75–99.
- 5) McCave I.N., Hall I.R. Size sorting in marine muds: Processes, pitfalls, and prospects for paleoflow-speed proxies // *Geochem. Geophys. Geosyst.* – 2006. – Vol. 7. – № 10. – P. 2–32.

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ДОННЫХ ОСАДКАХ МЕЛКОВОДНЫХ БУХТ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Рюмина А.А., Тищенко П.Я., Шкирникова Е.М.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: органический углерод, геохимия донных осадков, тяжелые металлы.

В период с 2018-2021 г были проведены геохимические исследования шести кернов донных отложений из бухт Воевода, Новгородская и залива Угловой, которые включали измерения содержания тяжелых металлов (ТМ) (Zn, Cu, Pb, Ni, Co, Cr, Mn) и концентрации органического углерода по глубине керна с интервалом в 5-13 см. Для всех мелководных бассейнов керны отбирались в местах произрастания лугов морской травы *Zostera Marina* (ЗМ) и в местах ее отсутствия.

Одно из важных достоинств ЗМ в качестве интегрального индикатора состояния прибрежной экосистемы состоит в том, что она является ключевым элементом, оказывающим влияние на состояние многих живых организмов в воде, на границе вода-дно и в верхнем слое донных отложений. Предыдущие исследования показали способность накапливать ТМ в листьях, стебле, корневище и корнях [1]. Очевидно, что при столь высокой продукции и способности к биоаккумуляции ЗМ, следует ожидать накопление ТМ в донных осадках покрытых лугами ЗМ, поскольку опавшие листья будут обогащать донные осадки не только органическим углеродом, но и ТМ. Именно по этой причине, при отборе кернов в бухтах Воевода и Новгородская, мы отбирали один керн в месте произрастания ЗМ., а второй, в месте ее отсутствия.

В заливе Угловой морская трава практически отсутствует, т.к. высокая продукция фитопланктона и перифитона в условиях низкого водообмена и эвтрофикации привела к высокой мутности вод залива, которая уничтожила луга ЗМ [2]. Поэтому керны отбирались в районах, где осуществляется антропогенная нагрузка.

Содержание ТМ в пробах определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии на аппарате AA-3600 (Shimadzu, Япония). Органический углерод в твердой фазе осадков был измерен на анализаторе TOC-VCPN с приставкой для сжигания твердых проб SSM-5000A (Shimadzu, Япония). Гранулометрический анализ выполнялся на лазерном анализаторе частиц Analysette 22 NanoTec (Fritsch, Германия). Скорость осадконакопления в пробах донных осадков была оценена из измерений активности техногенного радионуклида ^{137}Cs по глубине керна. Для бухты Воевода она составила 8 мм/год, для бухты Новгородской - 7 мм/год, а для залива Угловой - 3 мм/год.

В соответствии с работами других авторов [3] следовало ожидать более высоких значений $C_{\text{орг}}$ в осадках залива Угловой, поскольку осадки залива содержат высокую долю пелитовой фракции. Содержание органического углерода в заливе Угловой находится в узких границах (1 - 2 %). Это кажущееся противоречие обусловлено тем, что основным источником $C_{\text{орг}}$ в донные осадки бухт является ЗМ. Более того, участки, покрытые лугами ЗМ, содержат более высокие концентрации $C_{\text{орг}}$, в сравнении с участками на которых отсутствуют луга ЗМ.

Содержание цинка для всех бассейнов примерно одинаковое для глубины осадка более 50 см - от 90 до 110 мг/кг. Однако для верхнего слоя донных отложений бухты Воевода (В1) концентрация цинка, существенно выше, чем в остальных бассейнах - 204 мг/кг. Для керна В1 также зафиксированы наибольшие концентрации меди - 91 мг/кг. Которые хоть и уменьшаются с увеличением глубины осадков, но явно выбиваются из общей картины - от 15 мг/кг до 34 мг/кг.

Для Pb, Cu, Zn, а так же Ni в донных осадках покрытых ЗМ в бухте Воевода обнаружена зависимость близкая к линейной, между концентрацией металлов и содержанием органического

углерода. Эту корреляционную связь можно объяснить физиологическими особенностями ЗМ. В ее листьях синтезируется полисахарид - зостерин. Это вещество является природным лигандом по отношению к ТМ. При отмирании травы органокомплексы обогащают донные осадки ТМ и органическим углеродом. Для других районов исследования такой четко выраженной корреляции нет.

Высокие концентрации марганца характерны также для осадков бухты Новгородская- от 344 мг/кг до 287 мг/кг. Распределение марганца по глубине осадка равномерно и не зависит от содержания органического углерода. Также в этой бухте зафиксированы наибольшие концентрации свинца - 45 мг/кг.

Содержание свинца по всей глубине керна для исследуемых бассейнов выглядит весьма хаотично - от 14 мг/кг до 45 мг/кг, четко выраженных зависимостей нет.

В заливе Угловой зафиксированы самые высокие концентрации никеля (31 мг/кг), кобальта (14 мг/кг), хрома (69 мг/кг) и марганца (383 мг/кг). Эти металлы относятся к группе рассеянных ТМ, поступающих в водные экосистемы с аллохтонным поверхностным стоком в составе высокодисперсных частиц взвесей. Накопление ТМ донными осадками залива осуществляется, по-видимому, через адсорбцию на взвеси, т.к. никакой зависимости от органического углерода для этого бассейна нет. Также становится ясно, что в отношении этих металлов данный бассейн подвергается антропогенному загрязнению, что уже отмечалось ранее [4]. Если оценить антропогенную нагрузку на исследуемые бассейны, то можно сделать вывод, что наибольшей нагрузке подвержен залив Угловой, а нагрузка на бухту Новгородская меньше, чем на бухту Воевода.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, № 20-05-00381-а и программы фундаментальных научных исследований, тема № 0211-2021-0014.

Список литературы

- 1) Brix H., Lyngby J.E. The distribution of cadmium copper, lead and zinc in eelgrass (*Zostera marina* L.) // *Sci. Total Envir.* V. 24. 1982. P. 51-63.
- 2) Тищенко П.Я., Барабанщиков Ю.А., Павлова Г.Ю., Рюмина А.А., Сагалаев С.Г., Семкин П.Ю., Тищенко П.П., Уланова О.А., Швецова М.Г., Шкирникова Е.М., Тибенко Е.Ю. Гидрохимическое состояние залива Угловой (Амурский залив) в разные сезоны // *Известия ТИНРО* Т. 201, №1. 2021. С. 138-157.
- 3) Иванов Д.В., Валиев В.С., Зиганшин И.И., Шамаев Д.Е., Паймикина Э.Е., Марасов А.А., Маланин В.В., Хасанов Р.Р., Унковская М.А. Структурная взаимосвязь гранулометрического состава, содержания органического вещества и тяжелых металлов в донных отложениях // *Гидроэкология.* №2. 2020. С. 23-30.
- 4) Петухов В.И., Петрова Е.А., Лосев О.В. Загрязнение вод залива Углового тяжелыми металлами и нефтепродуктами в феврале 2010 [U+2012] 2016 гг. // *Водные ресурсы.* Т.46, №1. 2019. С. 102-113.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЗОВ И ОТЛОЖЕНИЙ ПОДВОДНОГО ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА КЕДР (ЮЖНАЯ КОТЛОВИНА ОЗЕРА БАЙКАЛ) ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИИ CLASS@BAIKAL-2022

Рязанцева К.Ю.¹, Видищева О.Н.¹, Большакова М.А.¹, Богданов А.А.¹, Ахманов Г.Г.¹,
Хлыстов О.М.²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Лимнологический институт Сибирского отделения РАН, г. Иркутск

Ключевые слова: геохимия, органическое вещество, изотопный состав, озеро Байкал, морская геология, грязевой вулканизм.

Геохимические исследования позволяют характеризовать природу органического вещества донных осадков, понять, где мы встречаем в осадках остатки современной биоты, а где фиксируем миграционное, катагенетически преобразованное органическое вещество, которое мигрировало из глубин в приповерхностную зону. При геохимических поисках исследуются газы донных осадков и растворимое в органических растворителях органическое вещество (ОВ).

Исследования газа предполагают изучение молекулярного и изотопного состава углерода углеводородных газов.

Изучение ОВ производится пиролитическими методами (Rock-Eval), что позволяет определить содержание ОВ и некоторые его характеристики, которые для донных осадков не всегда легко интерпретировать. Растворимая часть ОВ выделяется из осадков экстракцией, далее изучаются ее молекулярный состав (методом хромато-масс-спектрометрии) и изотопный состав углерода различных аналитических групп в составе экстракта. Существует множество геохимических параметров, позволяющих определить зрелость вещества, его исходный состав, состав биопродуктов-предшественников ОВ, например такие параметры как: $aa_{20S}/(S+R)C_{29}$, $bb/(aa+bb)C_{29}$, $22S/(22S+22R)C_{32}$, Ts/Tm .

В период с 23 июня по 7 июля 2022 года на озере Байкал проходила VII Международная экспедиция в рамках программы Training-through-Research, проект Class@Baikal на НИС «Г.Ю. Верещагин». В рейсе проводилось донное опробование. На грязевом вулкане Кедр, были отобраны образцы газа и донных осадков для дальнейших исследований. Грязевой вулкан Кедр расположен в южной котловине озера Байкала. Структура представляет собой небольшую сложнопостроенную возвышенность в рельефе дна и характеризуется разгрузкой УВ газов. В этом районе в обнажениях на берегу озера известны угленосные отложения танхойской свиты олигоценового возраста. Представляется также, что аналоги этих отложений в пределах котловины Байкала погружены на большую глубину, а их углистые прослои и пачки могут являться источником разгружающихся газов грязевого вулкана Кедр.

Осадок из грязевого вулкана представляет собой песчано-алевро-глинистый ил серого цвета, комковатый, обводнённый, вместе с осадком был поднят газовый гидрат массивной текстуры длиной около 20 см.

Исследования проб газа из отложений грязевого вулкана Кедр показали следующие результаты. В составе УВ газов преобладает метан (до 88%), среди гомологов были обнаружены этан, пропан, пропен, изо-бутан, бутан, бутен, нео-пентан, изо-пентан, пентан. Содержание углекислого газа в пробе составило 0,2%, водорода меньше 0,001%, концентрация гелия достигала 0,085%. Аномальное содержание углекислого газа и преобладание в составе УВ газов метана может свидетельствовать о гумусовом типе исходного ОВ.

Значение изотопного состава углерода метана составило -45‰ VPDB, что соответствует термогенному газу (значения термогенного газа – примерно от -20 до -70‰ VPDB) [1]. Полученные значения $\delta^{13}C(C_2H_6) > -36\text{‰}$ вместе с $\delta^{13}C(CH_4) > -54\text{‰}$ характерны для угольного типа газа [2].

Для изучения ОВ была проведена экстракция донных отложений, отобранных при опробовании структуры Кедр. Относительная масса экстракта составила 0,02%, в групповом составе преобладали мальтены (80%). Насыщенных соединений и смол в составе мальтенов было 40% и 43% соответственно, ароматики - 17%.

Был проведен биомаркерный анализ насыщенной и ароматической фракций органического вещества. В составе высокомолекулярных n-алканов наблюдается доминирование высокомолекулярных нечетных гомологов C₂₇, C₂₉, C₃₁, что указывает на повсеместно определяющий вклад высшей наземной растительности в формирование органического вещества. Также подобное распределение характерно для сингенетичного ОВ осадков.

В окислительных условиях из фитола образуется преимущественно пристан (Pr), в восстановительных - фитан (Ph). Поэтому отношение Pr/Ph можно использовать для оценки окислительно-восстановительного потенциала в бассейне. Отношение пристана к фитану (1,03) и характеристики Pr/C₁₇ (0,39) и Ph/C₁₈ (0,32) характеризуют среду накопления осадка на стадии диагенеза как переходную с ОВ смешанного типа.

Соотношения стеранов C₂₇, C₂₈, C₂₉ примерно равны, что характерно для ОВ, образованного из планктона и бактерий.

Отношения параметров зрелости aa20S/(S+R)C₂₉ (0,37), bb/(aa+bb)C₂₉ (0,54), 22S/(22S+22R)C₃₂ (0,52), Ts/Tm (2,25) и 4-метилдibenзотиофена к 1-метилдibenзотиофену (6,5) позволяют охарактеризовать ОВ как зрелое [3].

Таким образом, при помощи геохимических методов поиска, проанализировав состав ОВ и газа донных отложений, мы смогли дать характеристику исходному ОВ для разгружающихся флюидов в районе грязевого вулкана Кедр Южной котловины озера Байкал. Показано, что и в составе газов и в составе ОВ донных отложений присутствует миграционная часть термогенной природы. При этом исходное ОВ термогенной составляющей относится к гумусовому и смешанному типу органики, которая находится в главной зоне нефтеобразования. Дальнейшие исследования изотопного состава битумоидов и сопоставление результатов с биомаркерами запланировано.

Список литературы

- 1) Milkov A.V., Etiope G. Revised genetic diagrams for natural gases based on a global dataset of > 20,000 samples. // Organic Geochemistry. № 125. 2018. pp. 109–120.
- 2) Milkov A.V. New approaches to distinguish shale-sourced and coal-sourced gases in petroleum systems. // Organic Geochemistry, № 158 (4). 2021.
- 3) Peters K.E., Moldowan J.M. The Biomarker Guide. Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1993.

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВОЗРАСТЕ ХВАЛЫНСКОГО ПРОЛИВА

Семиколенных Д.В.^{1,2}, Панин А.В.²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Институт географии РАН, г. Москва

Ключевые слова: палеогеография, поздний плейстоцен, геохронология, хвалынская трансгрессия, Манычская депрессия, Каспий, малакофауна.

Манычская депрессия, на территории которой функционировал хвалынский пролив, расположена на юге европейской части России и представляет собой обширную слаборасчлененную низменную равнину. Днище депрессии занято системами заболоченных долин рек Западного и Восточного Манычей, а также частично заросшими и засоленными реликтивно-лиманными озерами [2].

В конце осташковского оледенения (МИС 2) в Каспии развивался опресненный раннехвалынский бассейн. Существуют различные точки зрения относительно количества его трансгрессивно-регрессивных фаз, однако практически все исследователи характеризуют его первую фазу наиболее полноводной (до 50 м абс.), во время которой произошло открытие раннехвалынского пролива в новоэвксинский бассейн Черного моря.

Впервые раннехвалынские виды моллюсков в отложениях Маныча были описаны в береговом обнажении у оз. Грузского В. В. Богачевым [1]. Характерными видами моллюсков нижнехвалынских отложений являются *Didacna ebersini*, *D. subcatillus*, *D. protracta*, *Monodacna caspia*, *Hypanis plicata*.

Первые радиоуглеродные датировки по фауне раннехвалынских моллюсков Маныча были получены в 2000 году [3]. В 2008–2009 годах Х. А. Арслановым (СПбГУ) была получена серия дат по ряду естественных разрезов [7, 8] и впервые одна дата получена методом AMS радиоуглеродного датирования в Университете Гронингена (Нидерланды) [4, 5].

В настоящее время геохронология раннехвалынского этапа Манычской депрессии построена на разрозненных датировках прослоев с хвалынской фауной различных береговых обнажений, что затрудняет сопоставление времени открытия раннехвалынского пролива с глобальной геохронологической шкалой и расчленение хвалынских отложений на горизонты, если таковые имеются.

В ходе полевых работ в Манычской депрессии в 2022 году нами был детально изучен разрез (ZT-3) отложений хвалынского пролива в Манычской депрессии, расположенный в естественном обнажении юго-западного берега Чограйского водохранилища на территории Ставропольского края.

В разрезе ZT-3 сверху вниз вскрываются следующие отложения: (1) коричневый суглинок (современная почва) мощностью 0,45 м с включением корней растений и карбонатных образований, переход к нижележащему слою постепенный; (2) палевый лессовидный суглинок плотный, с крупной столбчатой отдельностью мощностью 0,95 м, граница с нижележащим слоем нечеткая; (3) толща субгоризонтально переслаивающегося палевого алевролита с шоколадоподобными глинами мощностью 0,40 м с включением карбонатных конкреций и пятен ожелезнения и марганцевания, граница с нижележащим слоем четкая; (4) горизонтально и волнистослоистые коричневые (шоколадоподобные) глины мощностью 0,50 м с включением карбонатов, пятен ожелезнения и марганцевания, граница с нижележащим слоем нечеткая; (5) плохосортированные коричневые пески мощностью 0,50 м, неявная горизонтальная и косая слоистость, переход в нижележащий слой четкий; (6) коричневые суглинки мощностью 0,45 м с включением фауны каспийских моллюсков, неявная горизонтальная и косая слоистость, граница с нижележащим слоем четкая; (7) плохосортированные коричневые пески мощностью 0,60 м с включением фауны каспийских моллюсков, пятен ожелезнения и марганцевания, неявная горизонтальная и косая слоистость, пере-

ход в нижележащий слой четкий; (8) сизовато-коричневый тяжелый суглинок с многочисленными пятнами ожелезнения видимой мощностью до 0,6 м.

Малакофаунистический комплекс состоял из двух видов моллюсков: *Monodacna caspia* и *Hypanis plicata*, характерных для хвалынского комплекса Каспия.

По раковинам моллюсков, отобранных на глубинах 2,5, 3,0, 3,5 м, методом радиоуглеродного AMS-датирования были получены три датировки в диапазоне 14,2–14,9 тыс. лет.

Таким образом, строение разреза отражает условия осадконакопления завершающей (аккумулятивной) фазы функционирования хвалынского пролива. Малакофаунистический состав отложений свидетельствует о пониженной (по сравнению с раннехвалыньским бассейном) солености пролива.

На основании результатов AMS-датирования завершающий этап функционирования раннехвалыньского пролива в Манычской депрессии определен в интервале 14,2–14,9 тыс. л. н., что согласуется с ранее полученными нами данными ОСЛ-датирования хвалыньских отложений разреза Остров Левый [6]. В климатическом отношении это была эпоха деградации поздневалдайского (осташковского) оледенения (МИС 2).

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 22-17-00259.

Список литературы

- 1) Богачев В.В. Степи бассейна р. Маныч // Известия Геологического комитета. 1903. Т. 22. № 9. С. 73–162.
- 2) Свиточ А.А. Плейстоценовая история структуры Зунда Толга (Маныч) // Доклады АН. 2010. Т. 435. № 1. С. 215–220.
- 3) Свиточ А.А., Парунин О.Б. Радиоуглеродный возраст палеогеографических событий позднего плейстоцена Северного Прикаспия // Доклады Академии наук. М.: Наука, 2000. Т. 371. № 4. С. 535–535.
- 4) Свиточ А.А., Янина Т.А., Антонова В.М., Й. ван дер Плихт. Хвалыньская фауна Маныча // Доклады АН. Серия геогр. 2008. Т. 421. № 5. С. 987–992.
- 5) Свиточ А.А., Янина Т.А., Хоменко А.А., Новикова Н.Г. Хвалыньские отложения Маныча // Доклады Академии наук. М.: Наука, 2009. Т. 428. № 1. С. 70–74.
- 6) Семиколенных Д.В., Курбанов Р.Н., Янина Т.А. Возраст хвалыньского пролива в позднеплейстоценовой истории Манычской депрессии // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2022. №5. С. 103–112.
- 7) Arslanov Kh.A., Yanina T.A. Radiocarbon age of the Khvalynian Manych passage // Black Sea – Mediterranean corridor during the last 30 ky: sea level change and human adaptation. Bukharest: EcoGeoMar, 2008. P. 10–13.
- 8) Chepalyga A., Arslanov Kh., Yanina T. Detailed age control of the Khvalynian basin history // Black Sea –Mediterranean corridor during the last 30 ky: sea level change and human adaptation. Istanbul, 2009. С. 23–26.

ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ В ЗОНЕ ПРЕДПОЛАГАЕМОГО КОНТУРИТОВОГО ДРИФТА В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

Сломнюк С.В., Новичкова Е.А., Козина Н.В., Баранов Б.В., Кравчишина М.Д.

Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: осадочное тело, дрейфт, седиментация, автоматизированная система изучения керна, Карское море.

Контуристовые дрейфты – это осадочные тела на дне океанов и морей, сформированные в результате аккумуляции осадков под воздействием постоянных придонных течений преимущественно в районе континентального склона. Тем не менее, существуют разные типы дрейфтов, отличающиеся как по своим масштабам, так и по местоположению [1]. Объектом наших исследований является осадочное валлообразное тело, образовавшееся в тектонической депрессии в юго-западной части Карского моря, относящейся к Западно-Карской ступени. Изученная область отличается сложным изрезанным рельефом дна с перепадом глубин от нескольких сот метров до первых десятков метров [2].

Рассматриваемое осадочное тело расположено в линейной грабенообразной депрессии длиной 18 км и относительной глубиной до 160 м, с углами наклона склонов 15° – 20° в среднем и до 27° – 30° на наиболее крутых участках. Ширина депрессии в ЮВ части изменяется от 1.5 км до 1.7 км, в СЗ части от 2.8 до 3 км [3]. По особенностям морфологии и положению данное осадочное тело может быть проинтерпретировано в качестве контуристового дрейфта, который по классификации [4] относится к типу ограниченный (англ. confined) дрейфт. В рамках данной работы изучены осадочные колонки из трёх трубок большого диаметра (ТБД), отобранных на севере, юге и в центральной части осадочного тела в ходе 89-го рейса (1-й этап) НИС «Академик Мстислав Келдыш» в сентябре 2022 г. для исследования происхождения этого валлообразного образования. Для этой цели, помимо макроскопического литологического описания осадков на борту судна, колонки были изучены с помощью автоматизированной системы комплексного сканирования кернов MSCL-XYZ GEOTEK в лаборатории ИО РАН. Сканирование кернов позволяет получить данные по магнитной восприимчивости осадков методом магнитометрии, характеристикам яркости и интенсивности цвета методом спектрофотометрии и по элементному составу методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии.

По предварительным литологическим данным, верхние 6–7 м осадочного тела, вскрытые ТБД, представлены пелитовыми илами переслаиваемые алевритово-пелитовыми и песчаными отложениями. Во всех трёх колонках присутствуют стяжения гидротроиллита, содержание которого постепенно увеличивается в направлении с юго-востока на северо-запад по простиранию осадочного тела, а также с глубиной в осадках колонок. Литологическое описание колонок, подкрепленное данными спектрофото- и магнитометрии позволили заключить, что изученное валловое образование является единым осадочным телом. Мощности отдельных слоев постепенно увеличиваются с ЮВ на СЗ по простиранию осадочного тела, свидетельствуя о том, что его формирование происходило под влиянием направленных придонных течений, как главного фактора осадконакопления.

Согласно обобщённой классификации, предложенной несколькими авторами, исследуемое осадочное тело является контуристовым дрейфтом, который по-своему литотипу можно отнести к илистым контуристам (англ. muddy contourites) [5]. Особенностью данного типа дрейфтов является то, что его осадки более чем на 50% состоят из пелитового ила с примесью песчаной фракции до 15% и могут включать до 10% известково-кремнистых организмов, которые часто разрушаются и замещаются оксигидроксидами железа. В редких случаях илистые дрейфты имеют первичную слоистость, которая часто характеризуется изменением окраски или неравномерно сортированными прослоями более грубого материала. Такие отложения часто залегают довольно мощными

и плотными пачками. В арктических морях ближайшим аналогом изученного осадочного тела является высокоширотный дрейфт Квейтола [5], расположенный в желобе-троге западной континентальной окраины Баренцева моря и образованный в результате деятельности приледниковых течений.

Таким образом, исследуемое осадочное тело, образованное в результате деятельности придонных течений в небольшой тектонической депрессии в юго-западной части Карского моря, может быть проинтерпретировано как ограниченный илистый контуритовый дрейфт небольшого масштаба. Наличие на шельфе Карского моря тектонических депрессий [6], аналогичных выше рассмотренной, дает основание предположить, что в них могут располагаться осадочные тела, являющиеся контуритовыми дрейфтами и эта тема требует дальнейшего изучения поскольку несет большой научный и практический потенциал.

Авторы благодарят экипаж НИС «Академик Мстислав Келдыш» а также всех участников экспедиции за помощь при работе с донными осадками.

Работа выполнена для гос. задания № FMWE-2021-0006.

Список литературы

- 1) Rebesco M., Hernández-Molina F.J., Rooij D.V., Wåhlin A. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations // *Marine Geology*. – 2014. – № 352. – С. 111–154.
- 2) Левитан М.А., Хусид Т.А., Купцов В.М. и др. Типы разрезов верхнечетвертичных отложений Карского моря // *Океанология*. – 1994. – Т. 34. – №5. – С. 776–788.
- 3) Сорохтин Н.О., Никифоров С. Л., Ананьев Р.А. и др. Геодинамика арктического шельфа России и рельефообразующие процессы в Центральном-Карском бассейне // *Океанология*. – 2022. – Т. 62. – № 4. – С. 625–635.
- 4) Rebesco M., Özmaral A., Urgeles R. et al. Evolution of a high-latitude sediment drift inside a glacially-carved trough based on high-resolution seismic stratigraphy (Kveithola, NW Barents Sea) // *Quaternary Science Reviews*. – 2016. – № 147. – С. 178–193.
- 5) Stow D.A.V., Faugères J.-C. Contourite facies and the facies model / In: Rebesco M., Camerlenghi A. (Eds.) *Contourites*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier. – 2008. – V. 60(13). – С. 223–256.
- 6) Вербя М.Л. Современное билатеральное растяжение земной коры в Баренцево-Карском регионе и его роль при оценке перспектив нефтегазоносности // *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. – 2007. – №2. – С. 1–37.

СОЗДАНИЕ БОТА НА ЯЗЫКЕ PYTHON ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ ФИЛЬТРОГЕННЫХ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ НА ОСНОВЕ CSMHYD HYDOFF

Смирнов Ю.Ю., Щур Н.А., Щур А.А., Матвеева Т.В.

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана
имени академика И.С. Грамберга», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: зона стабильности газовых гидратов, бот, python.

В рамках работ по количественной оценке ресурсов природного газа в газовых гидратах российских акваторий, выполненных в 2021 и году ФГБУ «ВНИИОкеангеология» [1], ставилась задача по прогнозному картированию условий газогидратоносности для газовых гидратов (ГГ) фильтрогенного генезиса – нестабильных соединений воды и природного газа, образующих с помощью водородной связи льдоподобную кристаллическую решетку. Под условиями их существования подразумевается зона стабильности газовых гидратов (ЗСГГ) – та часть литосферы (и океана), в пределах которой ранее образовавшиеся газовые гидраты (ГГ) остаются в стабильном состоянии. Существование ЗСГГ определяется главным образом термобарическими условиями среды, именуемыми «равновесными». Данные равновесные условия, представляются, как функция давления от температуры, например [2]: $\ln(P_D) = \sum_{n=0}^5 a_n (T + T_D)^n$, где P_D – равновесное давление, T – температура среды, T_D – отклонение температуры за счет халинных свойств среды, a_n – эмпирические константы. По данному уравнению, сопоставляя реальные условия среды «in situ» с равновесными, можно найти границы ЗСГГ – ее мощность (толщину). Функция равновесного давления представляет из себя модель регрессии, построенную по результатам лабораторных исследований. Правильный подбор коэффициентов регрессии в отсутствие собственных данных является нетривиальной задачей, сопряженной с целым рядом трудностей, в первую очередь, с большими затратами времени. Альтернативным вариантом служит использование готового программного обеспечения (ПО) – «черного ящика», позволяющего избежать методологических шероховатостей в области газогеохимии. В качестве такого ПО можно рассматривать свободно распространяемую программу CSMHYD Hydoff – [3], разработанную на языке Fortran в конце XX века [4] и представляющей из себя исполняемый файл – консольное приложение с разрешением «.exe». Внутри которой уже заложены множественные регрессионные модели, позволяющие рассчитывать равновесное давление, как функцию не только термохалинных свойств среды, но и учитывать при этом многокомпонентный состав газа. Однако данная программа является одномерной с вводным данных в ручном режиме: каждое уравнение решается лишь один раз, выдавая на выходе только одно значение равновесного давления для одной равновесной температуры (с точностью до с точностью до 10^{-3} K). При этом в зависимости от размаха вариации температур необходимая длина равновесной кривой может достигать тысячи значений. В связи с чем встает вопрос об автоматизации процесса исчисления равновесной кривой средствами Hydoff.

Программу-робот, получившую в последствие наименование «GHSZ_VNIO», можно разделить на три блока. Расчет производится для сети станций произвольного размера, в качестве переменных на входе, помимо координат станций, требуются гидрологические и геотемпературные характеристики. «Блок интерфейса», написанный на PyQt, представляет из себя окно, содержащее 4 рабочих кнопки с полями для выбора пути вводимых и выводимых файлов. «Блок работа» основан на использовании библиотеки Subprocesses, а именно класса subprocesses.Popen, позволяющего выполнять дочернюю программу в новом процессе. Основными параметрами класса являются STDIN и STDOUT, отвечающие за ввод и вывод данных. Параметр STDIN принимает

значение класса `STDIN=subprocess.Pipe`. Такое задание параметра позволяет с помощью функции `stdin.write(...)`, предварительно импортировав необходимые данные в любом виде, с помощью обыкновенных циклов ввести значения температуры и солености в `Pipe`, произвести расчет в дочернем процессе `Hydoff.exe` и, предварительно задав путь, вывести полученные результаты во временный текстовый файл. Результаты работы «Блока робота» представляют из себя равновесную кривую наподобие использованной ранее функции [2]. «Блок обработки» заново импортирует данные из временного файла, и, подключив также массивы характеристик среды, строит «реальную» температурную кривую, начало которой находится в слое придонной воды, а конец – на некоторой глубине в осадочном слое. На последнем этапе производится сравнение двух кривых – «реальной» и «равновесной», поиск их пересечений, расстояние между которыми и будет мощностью (толщиной) ЗСГГ.

Программа-работ позволяет за 15 минут реального времени высчитать мощность ЗСГГ для 200 тыс. станций при однокомпонентном составе газа (100% CH_4). В итоговом файле, помимо толщины ЗСГГ для каждой станции с координатной привязкой, содержатся также использованные в расчете гидрологические и геотемпературные параметры, позволяющие строить океанологические поля всех перечисленных характеристик и производить анализ полученных данных. В том числе дать приблизительную количественную оценку запасов метана в ГГ на основе построенных карт мощность ЗСГГ. Несмотря на то, что сама ЗСГГ является зоной лишь возможной локализации ГГ, полученные данные согласуются с результатами экспедиционных исследований и некоторыми приведенными в литературе оценками.

Список литературы

- 1) Матвеева Т.В. Количественная оценка ресурсов газовых гидратов в акваториях морей Российской Федерации (этап 2) // Отчет о результатах работ, выполненных за 2020 год в рамках Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 13 октября 2020 года №049-00018-20-03 на 2020 год и на плановый период 2021 и 2022 годов. СПб. ВНИИОкеангеология. 2020
- 2) Malakhova V. The response of the Arctic Ocean gas hydrate associated with subsea permafrost to natural and anthropogenic climate changes. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 606.
- 3) Sloan E.D. Gas hydrates: review of physical/chemical properties // Energy & Fuels. 1998. Vol. 12. No 2. P. 191–196
- 4) Saheb Maghsoodloo Babakhani, Mahmoud Bahmani, Jafar Shariati, Kiumars Badr, Yahya Balouchi, Comparing the capability of artificial neural network (ANN) and CSMHYD program for predicting of hydrate formation pressure in binary mixtures, Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 136, 2015, Pages 78-87, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.11.002>

ПАЛЕООКЕАНОЛОГИЯ ГОЛОЦЕНА ПО БЕНТОСНЫМ ФОРАМИНИФЕРАМ БАРЕНЦЕВА МОРЯ В ПРОЛИВЕ СТУР-ФЬОРД (ШПИЦБЕРГЕН)

Смирнова К.М.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: палеоэкология, таксономическое разнообразие, статистический анализ.

Арктический бассейн представляет собой активно исследуемый регион в геологии. С каждым годом учёные-океанологи получают новые и более точные данные, тем самым формируя более точное представление о геологии района. В данной работе, посредством микропалеонтологического фораминиферного анализа, устанавливаются палеоэкологическая и палеоокеанологическая обстановки в районе Шпицбергена в проливе Стур-фьорд.

Фораминиферы являются довольно чувствительными индикаторами окружающей среды. Это маленькие организмы (<1 мм), но размер некоторых из них может превышать и 1 см. По составу раковины фораминиферы делятся на агглютинированные и секреторно-известковые, и у последних раковина отлично сохраняется в геологической летописи, неся в себе информацию о палеосреде. Бентосные фораминиферы - очень многочисленная и разнообразная группа простейших организмов. Они обитают во всех зонах моря, начиная от супралиторали и кончая максимальными глубинами абиссали. Эти особенности делают фораминифер чрезвычайно ценными не только для выделения зоогеографических зон, но и для палеоэкологии и палеоокеанологии. Использование бентосных фораминифер в качестве маркеров основных параметров окружающей среды в морских и океанических бассейнах дает ценную информацию об изменениях условий в том или ином районе.

Миниколонки донных осадков 5935, 5936, 5937, мощностью 31, 26 и 26 см были отобраны во время 71-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2018 году с помощью мультикорера фирмы KUM (Германия). Мультикорер позволяет отбирать колонки длиной до 60 см диаметром 140 мм с ненарушенной поверхностью, а также наддонную воду с горизонтов от +10 до +30 см от дна. Для данной работы было изучено 83 образца с интервалом пробоотбора в 1 см.

По колонкам численность бентосных фораминифер достаточно изменчива. Получены первые данные по распределению и таксономическому разнообразию бентосных фораминифер в осадках Стур-фьорда. В анализируемом материале общая число подсчитанных раковин фораминифер составило более 25000 экземпляров, представленных 42 видами. Видовое разнообразие ассоциации является постоянным на протяжении всего разреза. В комплексе фораминифер выделяется 5 массовых видов, которые составляют большую часть этого сообщества: *Cassidulina reniforme*, *Buccella frigida*, *Elphidium clavatum*, *Islandiella norcrossi*, *Melonis barleeanus*. Доминирующим видом для всех разрезов является *C. reniforme*, что говорит о типичных арктических холодноводных обстановках с придонной соленостью не ниже 30‰ [2].

На текущий момент, на основе статистического анализа, проведенного по комплексам бентосных фораминифер, реконструирована палеоэкологическая обстановка Баренцева моря в районе Стур-фьорда, в том числе установлен общий тренд к потеплению климата в позднем голоцене.

Подготовка, обработка проб и микропалеонтологический анализ выполнен по проекту РНФ № 21-17-00235.

Список литературы

- 1) Murray J.W. Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera. Harlow: Longman. 1991.
- 2) Polyak L., Korsun S., Febo L. et al. Benthic foraminiferal assemblages from the southern Kara Sea, a river influenced Arctic marine environment // Foraminiferal Res. 2002. V. 32. N. 3. P. 252–273.

- 3) Корсун С.А. О возможной связи морфологии раковин бентосных фораминифер с условиями осадконакопления и трофическим фактором // Геология морей и океанов: Тез. Докл. VIII Всес. Школы мор. Геологии. Т. 1. М., 1988. С. 58-59.
- 4) Поляк Л.В. Фораминиферы донных отложений Баренцева и Карского морей и их стратиграфическое значение: Автореф. Дис. канд. геол.-мин. Наук. Л.: ПГО «Севморгеология», 1985. 22 с.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ НА ОЗЕРЕ БАЙКАЛ

Соловьева М.А.¹, Ахманов Г.Г.¹, Хлыстов О.М.²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

Ключевые слова: озеро Байкал, сейсморазведка, газовые гидраты, BSR, фокусированная флюидоразгрузка.

Газовые гидраты – твердые кристаллические льдоподобные соединения газа (чаще всего метана) с водой, образующиеся при определенных термобарических условиях (при низких температурах и высоком давлении) и наличии достаточного количества газа. Особенности кристаллической решетки приводят к тому, что при разложении одного объема газового гидрата выделяется до 160 объемов свободного газа, в связи с чем в настоящее время газовые гидраты рассматриваются как один из перспективных нетрадиционных источников природного газа

В настоящее время Байкал – единственный пресноводный водоём, в осадках которого были обнаружены природные газогидраты. История их изучения на Байкале насчитывает более 40 лет с момента выдвижения первых предположений о возможности существования здесь газогидратов [1]. Проведенные в 1989 и 1992 гг. морские глубинные геофизические работы методом отражённых волн позволили обнаружить косвенные свидетельства наличия газогидратов в осадках озера – наличие границы BSR (bottom simulating reflector) [2], часто с соответствующей и нижней границе интервала распространения газовых гидратов. Предсказанное существование газогидратов было подтверждено глубоководным бурением в 1997 году [3], а затем и при отборе придонных осадков в 2000 году [4].

Оценка общих запасов газовых гидратов проводилась путем создания карты распространения границы BSR в 1997 году [5], основанной на интерпретации сейсмических профилей 1989-1992 года и охватывающей южную и центральную котловины в окрестностях дельты Селенги. Прогнозная карта на всё озеро построена на основе теоретических расчётов глубины залегания нижней границы стабильности газогидратов, базируясь на данных о величине теплового потока [5, 6]. Однако данные карты недостаточно точны из-за слабой разрешающей способности методов и редкой сети наблюдений. Дальнейшие исследования не вносили значительных корректировок в созданные схемы в связи с тем, что глубинные сейсмические работы на Байкале до 2022 года не проводились.

Летом 2022 года впервые за 30 лет были организованы многоканальные сейсморазведочные работы большой глубинности в седьмой Международной геолого-геофизической экспедиции проекта Class@Baikal. Одной из основных задач рейса являлось обнаружение и изучение характеристик границы BSR с целью расширения и уточнения существующих схем её распространения. Работы выполнялись с использованием пневмоисточника, излучающим сигнал с центральной частотой 150 Гц, и 96-канальной приёмной пьезокосой. Глубинность исследований составила 500-700 м ниже уровня дна.

Выполненные исследования позволили обнаружить и закартировать границу BSR на новых территориях, увеличив площадь, выделенную предыдущими исследователями, приблизительно в 1.5 раза. Глубина залегания поверхности BSR, в целом, соответствует значениям теоретической глубины залегания нижней границы газогидратного слоя, рассчитанной на основе измерений теплового потока [6]. Однако более высокая разрешающая способность метода позволила детализировать карту и выявить особенности конфигурации и динамических характеристик границы BSR. Обнаружены области, где поверхность BSR не параллельна дну и испытывает поднятие, пространственно приуроченные к известным структурам фокусированной флюидоразгрузки. Это

обосновывается сокращением зоны стабильности газогидратов при возрастании теплового потока в областях активной вертикальной миграции флюидов, а обнаружение таких мест является перспективным поисковым признаком новых структур фокусированной флюидоразгрузки.

Также, анализ волнового поля показал, что амплитуда, частотный состав и ширина рефлектора, соответствующего границе BSR, сильно варьируют в различных частях озера и, вероятно, связаны с современными тектоническими обстановками и интенсивностью миграции флюидов. На участках выровненного дна глубоководных котловин озера на тектонически стабильных участках граница BSR проявляется преимущественно в виде отчетливо выраженного узкого ровного высокоамплитудного рефлектора или прослеживается по окончаниям высокоамплитудных, часто круто наклоненных отражений. В других случаях граница BSR проявляется в виде серии высокоамплитудных рефлекторов, иногда расположенных на разных уровнях. Такие зоны приурочены к бортам котловин и разломным зонам, а также часто встречаются при приближении к структурам фокусированной флюидоразгрузки на дне.

Таким образом, морфология поверхности BSR и характер её проявления в волновом поле существенно варьирует на площади, что закономерно связано с тектоническим строением байкальской впадины и величиной теплового потока.

Список литературы

- 1) Ефремова А.Г., Андреева М.В., Левшенко Т.В. и др. О газах в осадках Байкала // Газовая промышленность. Сер. Геология и разведка газовых и газоконденсатных месторождений. 1980. № 2, с. 15–27.
- 2) Hutchinson D.R., Golmshtok A.J., Scholz C.A. et al. Bottom simulating reflector in Lake Baikal // EOS. 1991, v. 72, p. 307.
- 3) Кузьмин М.И., Калмычков Г.В., Гелетий В.Ф. и др. Первое обнаружение газогидратов в осадках озера Байкал // Докл. РАН. 1998. Т. 362, № 4, с. 541–543.
- 4) Клеркс Я., Земская Т.И., Матвеева Т.В. и др. Гидраты метана в поверхностном слое глубоководных осадков озера Байкал // Доклады Академии Наук. 2003. Т. 393, № 6, с. 822–826.
- 5) Гольмшток А.Я., Дучков А.Д., Хатчинсон Д.Р. и др. Оценки теплового потока на озере Байкал по сейсмическим данным о нижней границе слоя газогидратов // Геология и геофизика. 1997. Т. 38, № 10, с. 1677–1691.
- 6) Голубев В.А. Геотермический прогноз глубин нижней границы газогидратного слоя в донных отложениях озера Байкал // Доклады Академии Наук. 1997. Т. 352, № 5, с. 652–655.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОНОВОЙ И ФОКУСИРОВАННОЙ РАЗГРУЗКИ УГЛЕВОДОРОДОВ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

Юмашева А.К.^{1,2}, Полудеткина Е.Н.², Токарев М.Ю.², Рыбалко А.Е.³, Киль А.О.³

¹Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, г. Москва

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

³ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: северо-восточная часть Карского моря, донные осадки, флюидоразгрузка, углеводороды, миграция газов.

В 2022 г. МГУ имени М.В. Ломоносова при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации была проведена многопрофильная научная экспедиция TTR-21 в северо-восточной части Карского моря по программе «Обучение-через-исследование (Плавающий Университет)». Район работ находится в северной части Карского моря, в непосредственной близости от острова Уединения. В геоморфологическом отношении южная часть района работ представляет подводную равнину глубиной 100-200 м; к северо-западу расположен желоб Воронина в своем южном замыкании [1].

В настоящее время повсеместно растет интерес к проблеме выделения газопроявлений в толще донных отложений и толще морской воды, поэтому одной из задач исследований в рамках экспедиции являлся комплекс работ, направленный на получение данных об особенностях газонасыщенных грунтов, миграции газа в грунтовой и водной толще.

Для детальных исследований газопроявлений использовались следующие методы:

- геофизические (высокоразрешающая сейсморазведка 2D, высокочастотное эхолотирование, съемка гидролокатором бокового обзора, сейсмоакустическое профилирование придонной части геологического разреза);
- геологические (донный пробоотбор гравитационной трубой);
- гидрологические (зондирование и профилирование CTD (электропроводность, температура, плотность));
- гидрогеохимические (определение химического состава поровых и придонных вод, аутигенных минералов, концентрации и состава газа в пробах осадков, изотопный анализ углерода и водорода углеводородов, углеводородного состава органического вещества донных осадков).

В ходе проведенных исследований было изучено 5 ключевых участков, на которых были обнаружены признаки флюидоразгрузки: «Brachyura», «Clione», «Limacina», «Scallop», «Kasania». На всех участках по данным сейсморазведки сверхвысокого разрешения (ССВР) и акустического профилирования (АПр) были выделены обширные области флюидоразгрузки, определена кровля газонасыщенных отложений, которая характеризуется повышенными амплитудами, резкой сменой волновой картины на хаотичный тип записи и экранированию нижележащего разреза.

Для ключевых участков «Brachyura» и «Kasania» характерно наличие полей покмарок, выделяющихся в рельефе дна. Формирование данных структур происходило в результате фокусированной флюидоразгрузки из недр осадочного чехла.

На детальной площади «Clione» было выделено два предположительных разрывных нарушения, по которым закладывались русла эрозионных долин, можно предполагать разгрузку флюида в данных областях, также в верхней части разреза по акустическим данным были обнаружены интенсивные зоны миграции флюида, сопровождающиеся обширным газовым фронтом в первых

десятках метров разреза, предположительно связанные с деградацией мерзлотных толщ, которые, возможно, могли являться флюидоупором на глубине.

На участке «Limacina» по данным высокочастотной сейсмоки обнаружены предположительно газовые фронты, подходящие к поверхности морского дна. При этом, в водном столбе наблюдались признаки флюидоразгрузки. Также было выделено 2 разлома, которые проявляются в современном донном рельефе.

На участке «Scallor» выделена структура, подобная диапиру, предположительно ограниченная разрывными нарушениями, по которым может происходить флюидоразгрузка, также выделены врезы, характеризующиеся наличием акустически прозрачной толщи, что может указывать на газонасыщенность отложений [2].

Непосредственно над предполагаемыми областями распространения газового фронта были отобраны станции детального пробоотбора. В результате геохимических методов исследования выделены зоны с наличием повышенных и аномальных концентраций углеводородной газовой фазы, определен компонентный и изотопный состав газов, охарактеризован состав битумоидов в придонных отложениях. Показано, что в составе углеводородных газов преобладает метан (содержание метана достигает 700 ppm), в исследуемых пробах детектируются углеводороды до C5. Изотопный состав углерода метана варьирует от -80‰ до -26‰, что свидетельствует о наличии зон с различным генезисом газа. Как результат, зафиксированы углеводороды термогенного происхождения в осадочном чехле северо-восточной части Карского моря [2].

Экспедиционные работы выполнялись при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках плана-программы экспедиционных исследований МГУ имени М.В. Ломоносова по теме «Особенности четвертичного седиментогенеза, рельефообразования и природной флюидоразгрузки на морском дне в северо-восточной части Карского моря» и «Обучение-через-исследования на Арктическом шельфе».

Список литературы

- 1) Конторович В.А., Конторович А.Э. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности шельфа Карского моря // Доклады академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение " Российская академия наук". 2019. – Т. 489. – №. 3. – С. 272-276.
- 2) Полудеткина Е.Н., Токарев М.Ю., Юмашева А.К. [и др.] Особенности флюидоразгрузки на морское дно и в верхней части разреза в северо-восточной части Карского шельфа по результатам экспедиции ТТР-21 // Труды XI Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2022)». – 2022. – С.264-268.

ОСОБЕННОСТИ ГЛУБИННОГО СТРОЕНИЯ ШЕЛЬФА
ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯБашев И.А.¹, Корнева М.С.¹, Черных А.А.¹

¹ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: морская геофизика, аэрогеофизика, Восточно-Сибирское море.

Восточно-Сибирское море по своей площади является одним из самых крупных морей России, однако долгое время его акватория была слабо изучена геофизическими методами. В последние же годы был проведён ряд комплексных геофизических исследований, охвативших, практически, всю площадь акватории моря. Наиболее информативные из них были выполнены в пределах лицензионных участков недропользователей. На этих участках были проведены среднемасштабные аэромагнитные и аэрогравиметрические съёмки. Авторами проведён сбор, систематизация и объединение полученных материалов в единые цифровые модели аномалий гравитационного поля (АГП) и аномального магнитного поля (АМП) с последующей комплексной интерпретацией этих данных. Для уточнения глубинного строения шельфа Восточно-Сибирского моря использовались доступные сейсмические материалы разных лет. Вдоль отдельных сейсмических профилей были построены комплексные геолого-геофизические разрезы земной коры на основе гравимагнитного моделирования. Физические свойства горных пород, используемые при интерпретации, получены из материалов геологических съёмок континентального и островного обрамления Восточно-Сибирского моря.

Комплексная интерпретация геофизических материалов проводилась преимущественно на основе совместного анализа данных потенциальных полей, рассчитанных на их основе трансформант, батиметрической информации, а также гравимагнитного моделирования с использованием всех имеющихся в распоряжении авторов геологических материалов. В итоге были выделены и уточнены границы аномальных подразделений потенциальных полей (регионов, областей, зон), которые были соотнесены со структурно-тектоническими элементами региона исследований, на основе фондовых и опубликованных материалов.

По результатам комплексной интерпретации геолого-геофизических данных было установлено, что подавляющую часть изучаемой площади занимает Восточно-Сибирский-Чукотский регион, который включает в себя 4 крупные области: массив Де Лонга (ДЛ), Новосибирско-Северочукотскую систему прогибов (НССП), Восточно-Сибирский бассейн (ВСБ) и Новосибирско-Чукотско-Бруксовскую складчатую систему (НЧБСС). Новейшие геофизические данные позволили подчеркнуть особенности строения каждой из указанных областей.

Массив Де Лонга находится в СЗ части моря и с юга ограничен мощным выступом фундамента взбросо-надвигового характера [1]. Основываясь на результатах структурно-вещественного и количественного анализов, гравимагнитного моделирования и геологических исследованиях на близлежащих островах Де Лонга [2] было установлено, что породы массива на отдельных участках насыщены магматическими образованиями основного состава. В частности, речь может идти об излившихся платобазальтах.

НССП протягивается с запада на восток через всю площадь Восточно-Сибирского моря. Границы области постепенно расширяются в восточном направлении, в том же направлении увеличивается и мощность осадков. На западе, в зоне Новосибирского прогиба, мощность осадочного чехла составляет 4-5 км, а в зоне Северо-Чукотского мегапрогиба (СЧМ), на востоке, она увеличивается до 20 км. При этом в СЧМ отчётливо проявляются сбросовые разрывные нарушения,

что свидетельствует о его рифтогенном происхождении. Также отмечаются высокие перспективы пород осадочного чехла СЧМ на нефть и газ [3].

На западе Восточно-Сибирского моря авторами были уточнены границы ВСБ. По результатам гравимагнитного моделирования и интерпретации сейсмических данных в центральной части ВСБ установлено, что осадочный чехол и верхняя часть коры сильно осложнены многочисленными разломами, образующими сложные сочетания. Вероятно, данная область сформировалась в условиях косоугольного растяжения, о чем косвенно свидетельствует описываемая геометрия нарушений, близкая к геометрии цветковых структур. На северной окраине бассейна выделяется интрузивное тело в верхней коре. По результатам 3Д-моделирования установлена цилиндрическая форма интрузии с диаметром около 20 км и с глубиной залегания верхней кромки – 11.2 км. В качестве возможного аналога, телу может соответствовать выступ Антон Дорн в осадочном бассейне Рокколл на границе с Северо-Атлантической магматической провинцией [4].

НЧБСС занимает небольшую юго-западную и более обширную юго-восточную части исследуемой площади. В центральной части области, в районе зоны Дремхедского рифта, нижний слой осадочного чехла насыщен многочисленными внедрениями интрузивных образований, вследствие синрифтового вулканизма. Зона Врангелевского поднятия, на западе области, значительно осложнена многочисленными разрывными нарушениями, образующими мощные складчато-надвиговые структуры, которые, вероятно, протягиваются с о. Врангеля на шельф Восточно-Сибирского моря [5]. Также в зоне Врангелевского поднятия по результатам структурно-вещественного анализа отмечаются многочисленные участки магматических образований, схожих с платобазальтами массива Де Лонга, а к северу от о. Врангеля в фундаменте по сейсмическим данным и данным магниторазведки выделяется область базальтовых траппов типа Де-Лонга [6].

Исследование было проведено в рамках выполнения государственного задания Федерального агентства по недропользованию в 2020-2022 гг.

Список литературы

- 1) Drachev S.S., Malyshev N.A., Nikishin A.M. Tectonic history and petroleum geology of the Russian Arctic Shelves: an overview // Petroleum Geology: From Mature Basins to New Frontiers – Proceedings of the 7th Petroleum Geology Conference, 2010, 591–619
- 2) Косьюк М.К., Соболев Н.Н., Кораго Е.А., Проскурнин В.Ф., Столбов Н.М. Геология Новосибирских островов – основа интерпретации геофизических данных по Восточно-Арктическому шельфу России. // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2013, Т.8, №2
- 3) Скарятин М.В., Ставицкая В.Н., Мазаева И.В., Зайцева С.А. Применение результатов анализа траектории кромки клиноформ в пространстве для прогноза перспектив нефтегазоносности осадочного чехла Северо-Чукотского мегапрогиба // Нефтяное хозяйство. 2021. № 2, с. 40-45.
- 4) Schofield N., Jolley D., Holford S., Archer S., Watson D., Hartley A., Howell J., Muirhead D., Underhill J., Green P. Challenges of future exploration within the UK Rockall Basin // Geological Society, London, Petroleum Geology Conference series, 8, 211-229, 17 February 2017
- 5) Рекант П.В., Петров О.В., Прищепенко Д.В. Формирование складчато-надвиговой структуры южной части шельфа Восточно-Сибирского моря по результатам структурного анализа сейсмических материалов. // Региональная геология и металлогения. №82, 2020, с. 35-59
- 6) Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S., Malyshev N.A., Morozov A.F., Posamentier H.W., Verzhbitsky V.E., Freiman S.I., Rodina E.A., Startseva K.F., Zhukov N.N. Arctic Ocean mega project: Paper 2 – Arctic stratigraphy and regional tectonic structure // Earth-Science Reviews, Volume 217, 2021

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ДЕТАЛЬНЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА УЧАСТКЕ ВБЛИЗИ О-ВА УЕДИНЕНИЯ, КАРСКОЕ МОРЕ (ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИИ ТТН-21)

Буланова И.А.¹, Пирогова А.С.^{1,2}, Токарев М.Ю.^{1,2}, Рыбалко А.Е.³, Полудеткина Е.Н.²

¹ООО "Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова", г. Москва

²Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

³Санкт-Петербургский Государственный Университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: шельф, Карское море, сейсморазведка, гидроакустика, геоморфология, эрозионно-аккумулятивные процессы, криогенные процессы.

Летом 2022 г. в Карском море в ходе экспедиции ТТН-21 были проведены геолого-геофизические исследования, направленные на комплексное изучение верхней части разреза. Комплекс исследований включал в себя ряд сейсмоакустических и гидроакустических методов (ССВР – сейсморазведка сверхвысокого разрешения, АПр - акустическое профилирование, МЛЭ – многолучевое эхолотирование), а также донный пробоотбор с дальнейшими литологическими, геохимическими и гидрогеологическими исследованиями отобранных проб. На изученной площади с помощью описанного комплекса были отработаны детальные площадки, а также региональные профили, соединяющие их. Данный доклад посвящен результатам комплексного анализа одного участка детальных исследований, расположенного вблизи острова Уединения.

На данном участке наблюдалось большое разнообразие форм рельефа, сформированных за счёт деятельности различных экзогенных процессов. Основной целью данной работы является уточнение происхождения отдельных объектов, обнаруженных на детальном участке.

Глобально на полигоне выделяются два крупных поднятия в рельефе дна, центральная часть находится батиметрически ниже и отделена от них эрозионными врезами. Стоит отметить, что только на повышениях рельефа (глубина ~до 50 м) распространены борозды ледового/айсбергового выпаживания. На западном поднятии уверенно выделяется останец коренных отложений, который имеет неровную форму в плане и отчетливо виден на всех типах данных (МЛЭ, АПр, ССВР).

Другими ярко выраженными формами рельефа являются приповерхностные врезы, частично заполненные осадками, выделяющимися на сейсмоакустических разрезах по параллельно-слоистой записи. Ширина их составляет 500-700 м, глубина воды над тальвегом – от 60 до 100 м. Врезы вытянуты в северном направлении. Исходя из их положения на ЦМР ИВСаО, можно предполагать, что они протягиваются до Центрально-Карского желоба. Форма русла врезов сильно различается с севера на юг: на юге врезы практически полностью заполнены отложениями и плохо выделяются в рельефе дна, в то время как в северной части мощность заполняющих отложений сильно сокращается и глубина врезания увеличивается до 40 м, а наклоны склона достигают 15°. Другая отличительная особенность врезов проявляется на сейсмоакустических профилях: на поперечных разрезах, в особенности, в южной части видны изменения залегания осадков, заполняющих врезы, друг относительно друга, что может говорить о нескольких этапах формирования врезов.

В центральной части полигона наблюдается несколько различных форм рельефа, предположительно связанных с воздействием криогенных процессов. Так, к примеру, выделяются термокарстовые котловины диаметром до 200 м и глубиной от 1 до 10 м. Область, расположенная севернее, характеризуется бугристым рельефом: выделяются изометричные и линейно вытянутые непротяженные положительные формы. Данные формы рельефа имеют следующие геометрические параметры: диаметр 40-80м, высота <2 м, протяженность (для линейно вытянутых) до 250 м преимущественно в северо-восточном направлении. В одном месте данные бугры не вытянуты в

одном направлении, а образуют на дне изометричную в плане структуру диаметром 1 км. Деформации поддонных границ на данных АПр позволяют отнести их к посткриогенным структурам, напоминающим бугры пучения. Далее на север описанные выше гряды резко сменяются зоной распространения изометричных отрицательных форм рельефа, диаметром 30-50 м и глубиной менее 0.5 м. Предположительно, данные формы могут являться следами полигональных структур, также образованных вследствие воздействия криогенных процессов.

Таким образом, комплексная интерпретация различных форм рельефа, встреченных на изученном участке Карского моря, позволила уточнить их генезис и отнести к затопленным посткриогенным формам рельефа. Информация, полученная по разночастотным методикам съемки, а также по результатам донного пробоотбора может быть использована при геологическом картировании арктического шельфа для более точного описания строения геологического разреза.

Список литературы

- 1) Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Облогов Г.Е., Широков Р.С. Динамика субаквальной мерзлоты Карского моря в меняющихся климатических условиях // Материалы пятой конференции геокриологов России. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14-17 июня 2016 г. Ч. 5. Региональная и историческая геокриология. М.: Университетская книга, 2016. Т. 2. С. 26-30
- 2) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист Т-41-44 – мыс Желания. Объяснительная записка. – СПб.:Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. С. 115-120.
- 3) Ласточкин А.Н. Рельеф дна Карского моря // Геоморфология. 1977. № 2. С. 84-91.

ПУЗЫРЬКОВАЯ ЭМИССИЯ МЕТАНА В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ

Доманюк А.В.¹, Саломатин А.С.¹, Юсупов В.И.², Шахова Н.Е.^{1,3},
Семилетов И.П.¹, Черных Д.В.¹

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

²Институт фотонных технологий ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, г. Москва

³Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, г. Москва

Ключевые слова: газовый факел, сип, пузырьковый транспорт, всплывающие пузырьки, метан, моря Восточной Арктики.

Роль Арктики, особенно Восточно-Сибирского шельфа (ВСШ), крайне значима для климатических изменений, происходящих на нашей планете, так как на его территории сосредоточено более 30% мирового запаса основных парниковых газов – метана и двуокиси углерода [1]. Метан является эффективным парниковым газом, способным поглощать инфракрасное излучение как минимум в 35 раз сильнее углекислого газа. Мониторинг его атмосферной концентрации, в период с 2000 по 2019 гг., показал, что к концу второй декады 21 века его доля в Земной атмосфере увеличилась на 9% или на 50 млн тонн. В качестве основных компонентов, формирующих современный метановый баланс, рассматриваются антропогенные источники, а из природных наиболее значимыми называют ветлэнды тропиков. Данный вывод не согласуется с распределением атмосферного метана максимум которого сосредоточен в арктических широтах (фактические данные NOAA) и подразумевает наличие мощного регионального источника.

В настоящее время области непрерывной пузырьковой эмиссии метана были обнаружены во всех Земных океанах на глубинах от нескольких метров до 3 и более километров [2, 3]. Начиная с 2008 г в акваториях Арктических морей было зарегистрировано значительное число областей пузырьковой разгрузки метана, площадь которых варьировались от нескольких метров до 1 и более квадратного километра [4, 5]. Прямые измерения проб газа, переносимого такими пузырьками, показали, что в их составе преобладает метан [4, 5]. Проводимые комплексные исследования показали, что данные области в основном сосредоточены на глубинах не превышающих 100 метров и могут быть приурочены к районам донных отложений, в которых происходит процесс деградации подводной мерзлоты, а также разрушение газогидратных образований ранее с ней связанных. Неучет данных факторов при активном освоении Российской Арктики может привести к дополнительным экологическим и геоинженерным проблемам.

Газовым факелом (ГФ) или сипом называется участок водного столба, в который непрерывно из морского дна поступают всплывающие пузырьки. Впервые, сип был визуально обнаружен с борта подводного автономного аппарата Alvin более 30 лет назад в Мексиканском заливе, однако, с развитием вычислительной техники, для оперативной регистрации сипов в настоящее время применяют дистанционные акустические методы [6]. Современные эхолоты способны обнаружить одиночный всплывающий пузырек на глубинах более 3 км [3], оценить его размеры и скорость всплытия. Отдельно стоит выделить акустические данные, собранные многолучевыми эхолотами. Благодаря широкой диаграмме направленности таких устройств помимо более эффективного обнаружения ГФ, появилась возможность выделять морфологические особенности рельефа морского дна, приуроченные к областям пузырьковой эмиссии метана [6].

В предлагаемой работе представлен обзор сипов, зарегистрированных в комплексных океанографических экспедициях, выполненных в моря российского сектора Арктики. А также дана актуальная оценка потока метана.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ №: 22-67-00025 (анализ и обработка акустических данных) и госзадания № АААА-А20-120021990003-3 (сбор гидро-акустической информации).

Список литературы

- 1) Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the Permafrost–Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf // *Geosciences* (Switzerland). 2019. Т. 9.
- 2) Черных Д.В., Саломатин А.С., Юсупов В.И., Шахова Н.Е., Космач Д.А., Дударев О.В., Гершеллис Е.В., Силионов В.И., Ананьев Р.А., Гринько А.А., Семилетов И.П. Акустические исследования глубоководных газовых факелов охотского моря // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332. № 10. С. 57-68
- 3) Römer M., Hsu C.-W., Loher M., Macdonald I., Ferreira C., Pape T., Mau S., Bohrmann G., Sahling H. Amount and Fate of Gas and Oil Discharged at 3400 m Water Depth From a Natural Seep Site in the Southern Gulf of Mexico // *Frontiers in Marine Science*. 2019. Т. 6.
- 4) Chernykh D., Yusupov V., Salomatin A., Kosmach D., Shakhova N., Gershelis E., Konstantinov A., Grinko A., Chuvilin E., Dudarev O., Koshurnikov A., Semiletov I. Sonar estimation of methane bubble flux from thawing subsea permafrost: A case study from the laptev sea shelf // *Geosciences* (Switzerland). 2020. Т. 10, № 10. С. 1-14.
- 5) Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., Gustafsson O. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 2015. Т. 373, № 2052. С. 13.
- 6) Ананьев Р.А., Дмитриевский Н.Н., Росляков А.Г., Черных Д.В., Мороз Е.А., Зарайская Ю.А., Семилетов И.П. Использование комплексных акустических методов для мониторинга процессов эмиссии газов на шельфе Арктических морей // *Океанология*. 2022. Т. 62. С. 151-157.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ И ПРОЦЕССА МАССИРОВАННОГО ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАНА ИЗ МОРСКИХ ОСАДКОВ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ

Крылов А.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: тектоника, землетрясения, активные разломы, газовые сипы, плотность сейсмической энергии.

Сотрудники Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН вовлечены в исследования широкого консорциума научных организаций, касающиеся взаимосвязи явления массивированного выхода метана со дна моря Лаптевых и различных других природных процессов, включая сеймотектонические процессы в регионе. Выход газа из морских осадков, безусловно, относится к опасным геологическим явлениям. На карте распределения эпицентров землетрясений в море Лаптевых [1], а также крупных метановых сипов [2], т.е. мест активного выделения пузырькового газа с морского дна в водную толщу и далее в атмосферу, видно, что распределение сипов ориентировано вдоль предполагаемого трансформного разлома, представляющего из себя северо-восточный сегмент Хатангско-Ломоносовской зоны разломов (ХЛЗР). В этом районе возможен выход глубинного газа по системе разломов, приуроченной к ХЛЗР, что косвенно подтверждается выявленным преобладающим глубинным происхождением газа в этом районе [3]. Пути подводки газа к поверхности верхней части геологического разреза (ВЧР), вероятно, служат талики в вечной мерзлоте. Недавние работы подтверждают островное распределение мерзлоты на внешнем шельфе моря Лаптевых [4]. Обработка донных сейсмических шумов, зарегистрированных донными сейсмографами в этом же районе, и применение метода HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) также подтверждают этот факт: под одной из станций присутствовала контрастная отражающая граница в ВЧР, которую можно интерпретировать как кровлю вечной мерзлоты, под другой станцией такой границы не было [5]. Протаивание мерзлоты в этом районе может быть обусловлено повышенным тепловым потоком, которым характеризуются крупные разломные зоны. Существует корреляция области протаивания мерзлоты по данным морской электроразведки с гравитационными аномалиями, приуроченными к грабенам на шельфе моря Лаптевых и соответствующим обрамляющим разломам.

Сейсмические волны от землетрясений сами по себе могут служить триггером прорыва или регулятором интенсивности выхода геофлюидов из грунта [6]. Карты распределения плотности сейсмической энергии в Лаптевоморском регионе от региональных сейсмических событий из объединенного каталога по данным БД «Землетрясения России ЕГС РАН, ISC и USGS, а также от событий с Алеутской дуги и Аляски, демонстрируют, что в акватории моря Лаптевых возможно влияние сейсмических волн от локальных и удаленных землетрясений на интенсивность разгрузки метана из донных осадков в водную толщу – согласно [6] такой эффект начинает проявляться при значениях плотности энергии 10^{-6} - 10^{-5} Дж/м³.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FMWE-2021-0004 (описание современной тектоники региона), при финансовой поддержке в рамках гранта Президента РФ для поддержки молодых ученых № МК-45.2022.1.5 (исследование распределения землетрясений и газовых сипов в контексте анализа эндогенных геопасностей региона), гранта РНФ № 21-77-30001 (анализ механизма влияния тектоники региона на процесс выделения пузырькового метана из морских осадков).

Список литературы

- 1) Крылов А.А., Лобковский Л.И., Рукавишникова Д.Д., Баранов Б.В., Ковачев С.А., Дозорова К.А., Цуканов Н.В., Семилетов И.П. Новые данные о сейсмотектонике моря Лаптевых по наблюдениям донных сейсмостанций // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле. Том 507. № 1. 2022. С. 98-103.
- 2) Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G., Nicolsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., Gustafsson O. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // Philosophical Transactions of the Royal Society A. V. 373. 2015. Article ID: 20140451.
- 3) Steinbach J., Holmstrand H., Shcherbakova K., Kosmach D., Brüchert V., Shakhova N., Salyuk A., Sapart C.J., Chernykh D., Noormets R., Semiletov I., Gustafsson O. Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS). Vol. 118 (10). 2021. Article ID: e2019672118.
- 4) Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г. Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых // Доклады Российской Академии наук. Науки о земле. Том 500. № 1. 2021. С. 70-76.
- 5) Krylov A.A., Kulikov M.E., Kovachev S.A., Medvedev I.P., Lobkovsky L.I., Semiletov I.P. Peculiarities of the HVSR Method Application to Seismic Records Obtained by Ocean-Bottom Seismographs in the Arctic // Applied Sciences. 12. 2022. Article ID: 9576.
- 6) Shi Z., Wang G., Manga M., Wang C.-Y. Mechanism of co-seismic water level change following four great earthquakes – insights from co-seismic responses throughout the Chinese mainland // Earth and Planetary Science Letters. Vol. 430. 2015. P. 66–74.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ДЕЛЬТЕ Р. ЛЕНЫ

Новиков М.А., Крылов А.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: сейсмология, сейсмотектоника, шельф, море Лаптевых, река Лена, донные сейсмостанции, микросейсмичность, землетрясения.

Дельта р. Лены является одним из ключевых районов Лаптевоморского региона с точки зрения современных тектонических процессов, так как расположена на стыке древней Сибирской платформы с более молодыми структурами шельфа, которые испытывают в настоящее время напряжения растяжения. Согласно картам общего сейсмического районирования (ОСР-2015 С) [1] территории РФ, район дельты Лены является зоной повышенной сейсмической опасности с приуроченной возможной интенсивностью сейсмических колебаний до 10 баллов. Данный фактор важно учитывать при проектировании объектов повышенного уровня ответственности, а также при комплексном анализе возможных проявлений эндогенных геологических опасностей как на суше дельты, так и в акватории губы Буор-Хая (сейсмические воздействия, тектонические подвижки, выделение геофлюидов и прочее). Это определяет актуальность настоящей работы, целью которой является исследование особенностей сейсмического режима в районе дельты р. Лены.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Обработка записей сейсмостанций локальных сетей в дельте р. Лены, функционировавших в сезонах 2016-2017 и 2017-2018 гг.: поиск сигналов от локальных землетрясений и определение основных параметров землетрясений (магнитуда, время в очаге, трехмерные координаты)
- Построение карт и описание пространственного распределения эпицентров землетрясений и вертикальных сечений глубинного распределения очагов
- Анализ временного распределения сейсмических событий

В ходе работы было обнаружено, что большинство событий образуют облако эпицентров северо-западного – юго-восточного простирания, которое располагается между двумя левосторонними сдвигами, формирующими Оленекскую зону разломов. В расположении событий прослеживается четкая приуроченность эпицентров землетрясений к существующим активным сдвиговым и сбросовым разломам, располагающихся в направлении с северо-запада на юго-восток, а также с севера на юг в восточной части дельты.

В пределах Оленекской зоны разломов и в заливе Буор-Хая выделяется несколько кластеров землетрясений. Эпицентры наиболее крупного из них, расположенного вблизи западного края дельты р. Лена формируют облако, ориентированное в субмеридиональном направлении. Отдельные события регистрируются к северу от Оленекской зоны разломов. Субмеридиональный правосторонний сдвиг, который рассматривают [2] в качестве главной структурной границы, разделяющей новейшие структуры дельты р. Лена на геодинамические сегменты, в эпицентральной поле не выражен.

Кроме того, были построены вертикальные проекции трехмерного распределения очагов землетрясений на профили вдоль и вкрест Оленекской протоки. При анализе разреза вдоль протоки было выяснено, что глубина гипоцентров увеличивается с юго-востока на северо-запад (с 20 км до 30 км). Анализ разреза вкрест протоки показал, что при переходе от шельфовых структур на северо-востоке к Сибирской платформе на юго-западе плотность распределения гипоцентров резко падает. Это может быть обусловлено более жесткой структурой пород платформы.

Также исследовались кумулятивные графики повторяемости землетрясений для дельты р. Лена и губы Буор-Хая. Использовались как данные о землетрясениях из сводного каталога ЕГС РАН [3], ISC [4] и USGS [5], так и результаты локальных наблюдений в дельте р. Лены в сезоны 2016-2017 и 2016 – 2018 гг. Было обнаружено, что постепенное накопление данных о землетрясениях, записанных в рамках проекта «СИОЛА», существенно улучшает представительность каталога для района дельты Лены в диапазоне магнитуд до 2.

В ходе исследования были проанализированы графики повторяемости землетрясений и были определены их b-value, которые лежат в диапазоне 0.6-0.8. Такие значения b-value существенно ниже значений 1-2, характерных для роев землетрясений. Кроме того, временные зависимости количества произошедших землетрясений и их магнитуд не удовлетворяют закону Омори [6], что исключает их афтершоковую природу.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FMWE-2021-0004 (анализ взаимосвязи сейсмичности с тектоническими структурами региона), при финансовой поддержке гранта Президента РФ для поддержки молодых ученых № МК-45.2022.1.5 (описание распределения землетрясений в контексте анализа геопасностей), гранта РНФ № 21-77-30001 (анализ тектоники узла сейсмичности дельты р. Лены в контексте ее взаимосвязи с процессом газового выделения из морских осадков губы Буор-Хая).

Список литературы

- 1) СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах». 2018. Дата актуализации 01.01.2021.
- 2) Имаева Л.П. Динамика рельефа и сеймотектоническая активизация новейших структур дельты р. Лена // Геотектоника. 2019. № 5. С. 62-77.
- 3) База данных «Землетрясения России», Единая Геофизическая служба Российской Академии наук, Электронный ресурс: <http://eqru.gsras.ru/> (Дата обращения: 15.12.2022).
- 4) International Seismological Centre. Электронный ресурс: <https://doi.org/10.31905/D808B830> (Дата обращения: 15.12.2022).
- 5) U.S. Geological Survey. Электронный ресурс: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (Дата обращения: 15.12.2022).
- 6) Omori F. On the aftershocks of earthquakes // Journal of the College of Science, Imperial University of Tokyo. 1894. 7. P. 111–200.

ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ СЕЙСМОАКУСТИКИ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ С ЦЕЛЬЮ ПОИСКА ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Пальцев И.О.¹, Половков В.В.^{1,2}, Кудинов А.А.^{1,2}, Рыбалко А.Е.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

²ФГБУ «ВНИИОкеангеология», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: сейсмоакустика, волны-спутники, граф обработки, разрешающая способность, кратные волны.

Летом 2022 года в акватории Карского моря состоялась научно-исследовательская экспедиция TTR-21 («Training Trough Research»). Одной из задач экспедиции являлось геолого-геофизическое картирование зон проявления опасных геологических процессов (ОГП). Комплекс работ включал в себя геологический пробоотбор, сейсморазведку сверхвысокого разрешения (ССВР), акустическое профилирование (АПр) и многолучевое эхолотирование. Данные ССВР оперативно обрабатывались по типовому графу. После чего на временных разрезах в комплексе с материалами других методов выделяли геологические объекты и выбирали точки для донного пробоотбора. Исходные данные ССВР были осложнены волнением моря, наличием кратных волн и волн-спутников, подавление которых в типовом графе не осуществлялось. Современные процедуры обработки данных (ССВР) позволяют учитывать эти особенности волнового поля, что приводит к повышению разрешающей способности, улучшению возможностей сейсмостратиграфического анализа и более однозначному выделению геологических объектов.

Специфика инженерных сейсмоакустических исследований (приповерхностная буксировка, короткие косы, отсутствие контроля заглубления и др.) накладывает ограничения на диапазон классических процедур обработки, которые можно позаимствовать из нефтяной сейсморазведки [1]. Процедуры подавления кратных волн, основанные на различии в форме годографа однократных и многократных отражений, оказываются малоэффективны при съёмках с короткой системой наблюдения. А приповерхностная буксировка осложняет сигнатуру приёмно-излучающей системы и приводит к снижению разрешающей способности метода. Борьба с кратными волнами при малых удалениях может довольно эффективно осуществляться за счёт адаптивного вычитания модели поля кратных волн, полученной статическим сдвигом или расчётом функции автокорреляции [1]. Учёт же сигнатуры приёмно-излучающей системы и борьба с волнами-спутниками может осуществляться применением процедуры адаптивной рекурсивной фильтрации (SharpSeis deghosting) [2]. Реализованный в алгоритме адаптивный поиск задержки волны-спутника по временным и пространственным окнам позволяет учесть изменчивость заглубления и разное время прихода волн спутников.

Обработка данных сейсмоакустики должна учитывать особенности получаемых данных и в некоторых случаях, представляет собой итерационный процесс, состоящий из тестирования различных алгоритмов и выбора наиболее подходящих [3]. Поэтому, в ходе работы осуществлялся выбор процедур и подбор оптимальных параметров для эффективного подавления волн-помех.

Для тестирования модулей подавления волн-спутников и кратных волн на первом этапе были подготовлены модельные данные с точно известным положением границ и заглублением оборудования. Использовалась серия трехслойных моделей, отличающихся мощностью первого слоя – водной толщи. Первая граница представляла собой плоское горизонтальное дно, а вторая являлась криволинейной кровлей третьего слоя с пологим падением. Моделирование осуществлялось с сигналом спаркера, имеющего центральную частоту 220 Гц. Система наблюдений соответствовала применяемой в рейсе (16 каналов с интервалом 2 метра, шаг между пунктами возбуждения – 3

метра, минимальное расстояние между источником и приёмником – 10 метров). На втором этапе тестирование осуществлялось на части данных, полученных в рейсе, для более тонкой настройки. После чего, процедуры и параметры были применены ко всем реальным данным.

Предложенный граф позволил повысить качество данных за счет подавления волн-спутников и борьбы с кратными волнами. На сейсмических записях лучше выделились уже известные объекты, и стали различимы новые особенности волнового поля, что позволило уточнить карту опасных геологических процессов.

Список литературы

- 1) Verschuur D.J., Seismic Multiple Removal Techniques: Past, Present and Future. – Houten, The Netherlands: EAGE Publications, 2006. 174 p.
- 2) Вакуленко С.А. Современные методы обработки морской инженерной сейсморазведки // Труды Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии». – Москва: ООО «ПолиПРЕСС», 2018. – С. 892-897.
- 3) Вакуленко С.А., Буряк С.В., Шувалов А.А., Алехин А.А. Обработка данных высокоразрешающей сейсморазведки – подавление сигнатуры приёмно-излучающей системы // Материалы 17-й научно-практической конференции и выставки «Инженерная и рудная геофизика 2021». – Москва: ООО «ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ», 2021. – С. 1-7.

СОГЛАСОВАННАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ МОВ ОГТ С КОРОТКОЙ КОСОЙ 600М И ЗОНДИРОВАНИЙ МОВ-МПВ НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА ПРОФИЛЯ 1407 ЭКСПЕДИЦИИ "АРКТИКА-2014"

Табырца С.Н.^{1,2}, Жолондз А.С.², Половков В.В.^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² ФГБУ «ВНИИОкеангеология», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: сейсмические работы, МОВ ОГТ, МОВ-МПВ, зондирования, скоростная модель, согласованные скорости.

В ходе экспедиции «Арктика-2014» в арктическом регионе на ряду с другими профилями выполнен уникальный комплекс работ на профиле, проходящем от склона Баренцево-Карского шельфа через весь Евразийский бассейн и заканчивающемся в котловине Макарова. Длина профиля составила более 1500 км, а комплекс работ состоял из сейсмических (МОВ ОГТ и МОВ-МПВ), батиметрических и гравиметрических исследований. Сейсморазведочные работы МОВ ОГТ были выполнены с короткой (600 м) косой, что обусловлено сложными ледовыми условиями. Получение данных широкоугольных зондирований МОВ-МПВ было осуществлено с помощью постановки 28 сонобуев с интервалом постановки порядка 50 км.

Одной из главных задач обработки является получение скоростных характеристик среды, что невозможно сделать только по результатам работ МОВ ОГТ с короткой косой – длина годографа отраженной волны не позволяет уверенно выделить максимумы когерентности на рассчитанных вертикальных спектрах скоростей. Поэтому для определения скоростей продольных волн в осадочном чехле применялись сейсмические зондирования МОВ-МПВ с длиной годографа до 25 км. Опыт комплексирования данных видов работ и ранее применялся зарубежными исследователями [1].

Предыдущая обработка данных МОВ ОГТ и МОВ-МПВ была выполнена в 2014-2015г.г. после получения полевых материалов. В 2023г начата переобработка данных по профилю 1407 экспедиции «Арктика-2014» с целью актуализации полученных ранее результатов.

Обработка данных МОВ ОГТ и МОВ-МПВ представляет собой последовательность согласованных между собой этапов [2,3]:

- обработка данных МОВ ОГТ с короткой косой;
- обработка данных зондирований. Спектральный анализ отраженных волн по данным МОВ-МПВ с учетом выделяемых стратиграфических комплексов на временном разрезе МОВ ОГТ;
- пересчет временного разреза МОВ ОГТ в глубинный со скоростями, полученными по вертикальным спектрам (данные МОВ-МПВ). Выделение основных горизонтов;
- лучевое 2D моделирование отраженных и рефрагированных волн зондирований МОВ МПВ по модели, построенной в результате оцифровки глубинного разреза МОВ ОГТ из предыдущего этапа. Начальная скоростная модель последовательно корректируется после решений прямых сейсмических задач и сопоставления рассчитанных годографов с рефлекторами и рефракторами на наблюдаемых записях зондирований. При этом T_0 рассчитанных годографов отраженных волн, наложенных на записи зондирований должны совпасть с временами границ основных комплексов на разрезе МОВ ОГТ;
- согласование интервальных скоростей, полученных по вертикальным скоростным спектрам с интервальными скоростями глубинной скоростной модели. Дальнейшая коррекция глубинной скоростной модели;

- конвертация итоговой глубинной скоростной модели в SEG-Y файлы интервальных скоростей во временной области. Пересчет исходного временного разреза МОВ ОГТ в уточненный глубинный.

Согласованная обработка данных зондирований МОВ-МПВ в совокупности с данными МОВ ОГТ с короткой косой 600м позволяет создать согласованную 2D скоростную модель, учитывающую влияние рельефа границ, а также улучшить результаты обработки и интерпретации данных МОВ ОГТ.

В докладе будут представлены этапы согласованной обработки данных, результаты обработки 2014-2015 г.г. и результаты текущей переобработки материалов.

Список литературы

- 1) Bruvold V., Kristoffersen Y. et al. The nature of the acoustic basement on Mendeleev and northwestern Alpha ridges, Arctic Ocean, Tectonophysics. 2012. V. 514-517. P.123-145.
- 2) Безумов Д.В., Буценко В.В., Леонова Н.Е., Табырца С.Н. Построение согласованных скоростных моделей по сейсмическим данным МОВ ОГТ и зондированиям МОВ МПВ, полученным в евразийском бассейне северного ледовитого океана, Материалы VI Международной конференции молодых ученых и специалистов «Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового Океана», посвященная 70-летию основания НИИГА – ВНИИОкеангеология / Отв. ред. А. С. Бич. – СПб.: ФГБУ «ВНИИОкеангеология», 2018. С. 8-9.
- 3) Буценко В.В., Киреев А.А., Безумов Д.В., Поселова Л.Г., Леонова Н.Е., Смирнов О.Е., Кареев Г.Н., Жолондз А.С., Бруй Е.В., Табырца С.Н., Булаткина К.И. Согласованная скоростная модель и актуализированная карта мощности осадочного чехла Арктического бассейна на основе современной обработки новых сейсмических данных // 70 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане. Сборник научных трудов (под ред. В.Д. Каминского, Г.П. Аветисова, В.Л. Иванова). СПб.: ВНИИОкеангеология, 2018. С. 171-180.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МОРСКОЙ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ В ЗАЛИВАХ ЗАПАДНОГО ШПИЦБЕРГЕНА ПО ЭКСПЕДИЦИОННЫМ ДАННЫМ 2022 г.

Алексеева Н.К.^{1,2}, Никулина А.Л.¹, Рыжов И.В.¹, Корнилова Р.¹, Смирнов Н.А.¹,
Федорова А.А.¹, Новихин А.Е.¹

¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: карбонатная система, Западный Шпицберген, морская химия, CO₂.

Морская карбонатная система представляет собой сложный комплекс химических равновесий, происходящих между океаном и атмосферой, регулирует скорости биогеохимических процессов в морской экосистеме. Основными ее характеристиками являются общая щелочность, рН, равновесное парциальное давление углекислого газа (pCO₂), гидрокарбонатный (HCO₃⁻) и карбонатный (CO₃²⁻) ионы, растворенный диоксид углерода (CO₂), а также степень насыщенности воды арагонитом и кальцитом [1].

В работе использованы данные российской арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш), полученные в сентябре 2022 года в заливах Исфьорд и Грэнфьорд, где были проведены океанологические и гидрохимические работы. В химико-аналитической лаборатории РАЭ-Ш (пос. Баренцбург) были обработаны пробы морской воды на основные параметры карбонатной системы (рН и общая щелочность). Измерение рН проводилось с помощью лабораторного рН-метра Mettler Toledo Seven Compact S220, калибровка осуществлялась по трем точкам с использованием буферных растворов 4.01, 7.0, 9.21 Mettler Toledo. Для расчетов параметров карбонатной системы использовалась "шкала морской воды" (мкмоль/кг-SW). Определение общей щелочности предусматривало титрование пробы раствором соляной кислоты с одновременным пропусканием через титруемую пробу потока свободного от CO₂ воздуха до точки эквивалентности рН 5.5 [1]. Титриметрический анализ производился с помощью цифровой бюретки Biohit Biotrate 50 ml. Для определения поправочного коэффициента к концентрации раствора соляной кислоты использовался раствор натрия тетраборнокислого 10-водного с молярной концентрацией 0,02 моль/дм³ согласно [2]. Равновесное парциальное давление углекислого газа, содержание гидрокарбонатного и карбонатного ионов, растворенного диоксида углерода, а также степень насыщенности воды арагонитом и кальцитом были рассчитаны в программе Program Developed for CO₂ System calculations [3]. Определение потоков углекислого газа в системе океан-атмосфера производилось с использованием кубической параметризации Ваннинкова [4]. Для расчета использовались данные о концентрации диоксида углерода, измеренные на анализаторе монооксида и диоксида углерода CO12M от компании Environnement S.A., скорости ветра в поверхностном слое атмосферы (до 2 метров) измеренные на метеорологическом комплексе Campbell scientific.

Поверхностное распределение общей щелочности в исследуемых заливах находится в пределах 1436-2099 мкмоль/дм³ и заметно отличается от значений для открытых океанов и морей, (2000-2500 мкмоль/дм³). Так, в заливе Исфьорд общая щелочность находится в пределах 1540-1711 мкмоль/дм³, в заливе Грэнфьорд - 1436-2099 мкмоль/дм³. Данное изменение величины щелочности можно объяснить влиянием терригенного стока речных долин и ледникового стока, что обеспечивает динамическое смешение морских и поверхностных вод. Величина рН в исследуемых заливах менялась от 7,7 - 8,12. Для залива Исфьорд характерно среднее значение рН 7,97, для залива Грэнфьорд характерно 8,02. Парциальное давление углекислого газа в воде варьировалось от 219 до 693 ppm. Распределение величин параметров карбонатной системы характеризуется незначительными изменениями. В заливе Грэнфьорд продукты диссоциации угольной кислоты в

виде гидрокарбонатного иона (HCO_3^-) и карбонатного иона (CO_3^{2-}) в среднем составляют 1667 мкмоль/дм³ (HCO_3^-) и 83,5 мкмоль/дм³ (CO_3^{2-}). В заливе Исфьорд средние значения составляют 1472 мкмоль/дм³ (HCO_3^-) и 68 мкмоль/дм³ (CO_3^-). Поверхностный слой морской воды достаточно насыщен арагонитом (арагонит больше 1), такая среда благоприятно способствует образованию карбоната кальция (CaCO_3), раковин и скелетов. Степень насыщения морских вод арагонитом составляет от 1,04 (Исфьорд) и 1,27 (Грэнфьорд). Рассчитанные концентрации растворенного CO_2 варьируются от 11,5 мкмоль/дм³ до 36 мкмоль/дм³. Направление потока CO_2 между океаном и атмосферой зависит от разницы между парциальным давлением CO_2 в воздухе и в воде. В случае, если парциальное давление (p_{CO_2}) в воздухе выше, то будет происходить инвазия CO_2 , если p_{CO_2} воздуха ниже, то будет происходить эвазия CO_2 [5]. Расчет потока CO_2 на границе раздела вода-атмосфера показал распределение отрицательных значений в заливах Исфьорд (-0,4 ммоль/м² *сут) и Грэнфьорд (-2,9 ммоль/м² *сут). Данные величины характеризуют процесс инвазии CO_2 . Морские воды архипелага характеризуются достаточно равномерным распределением параметров карбонатной системы в поверхностном слое. Залив Грэнфьорд несколько отличается от залива Исфьорд тем, что он находится под более значительным влиянием речного и ледникового стока, что можно видеть по распределению концентраций общей щелочности, гидрокарбонатов. Поверхностные воды архипелага отмечаются достаточным насыщением арагонитом. Данный показатель является важным для оценки морской экосистемы в условиях acidification, так как арагонит выступает в роли строительного материала для большого числа морских организмов: кораллов, моллюсков. В исследуемых заливах зафиксирована инвазия углекислого газа в поверхностные воды.

Финансирование выполнено российской арктической экспедицией на архипелаге Шпицберген.

Список литературы

- 1) Dickson A.G. The carbon dioxide system in seawater: Equilibrium chemistry and measurements. Guide to Best Practices for Ocean Acidification Research and Data Reporting. 2010. P. 17-40.
- 2) Руководящий документ РД 52.10.743-2020 Общая щелочность морской воды. Методика измерений титриметрическим методом.
- 3) Robbins L.L., Hansen M.E., Kleypas J.A. and Meylan S.C. CO2calc: A user-friendly seawater carbon calculator for Windows, Max OS X, and iOS (iPhone)// U.S. Geological Survey Open-File Report. 2010. P. 17.
- 4) Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited. Limnology and Oceanography-methods. 2014. 12(6). P. 351-362.
- 5) Малинин В. Н., Образцова А. А. Изменчивость обмена углекислым газом в системе океан-атмосфера // Общество. Среда. Развитие. 2011. № 4. С. 220-226.

БИОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В РОССИЙСКИХ СЕКТОРАХ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В 2022 ГОДУ

Ефимова К.А.¹, Балашова К.А.¹, Бубнова Е.С.²

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

² Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: биогенные элементы, нитритный азот, фосфор фосфатов, Балтийское море, Финский залив.

Балтика обладает особым гидрохимическим режимом в силу слабого водообмена с Северным морем и значительной антропогенной нагрузкой. Согласно данным HELCOM [1], в список основных экологических проблем Балтийского моря входят эвтрофикация и загрязнение. Восточная часть Финского залива (ВчФЗ) [2] и российский сектор юго-восточной части Балтийского моря (ЮВБ) [3] существенно подвергаются эвтрофикации. В обоих случаях это связано с активной застройкой побережья и приносом биогенов со стоками рек [3, 4].

В данной работе сделана попытка сравнить летние гидролого-гидрохимические условия двух акваторий в части показателей, оказывающих влияние на эвтрофикацию: температура воды, концентрации минерального азота, фосфора и растворенного кислорода. Цель работы: оценка гидролого-гидрохимических параметров, благоприятных для развития эвтрофикации в ЮВБ и ВчФЗ (фосфор фосфатов, нитритный азот, температура воды и растворенный кислород).

Отбор проб производился в период с 28 июня по 7 июля 2022 г. в 61 рейсе ПС «Академик Иоффе» на 11 станциях в ВчФЗ и на 6 станциях в ЮВБ. Температура воды измерялась с помощью зонда CTD90M Sea&Sun tech. Определение нитритов производилось по методу Грисса-Илосвая; фосфатов – по методу Морфи и Райли. Оптические плотности окрашенных растворов измерялись при помощи спектрофотометра КФК-3. Концентрация растворенного кислорода определялась по методу Винклера.

Нитриты – один из лимитирующих факторов развития фитопланктона, являются промежуточным продуктом окисления азота до нитратов, соответственно, их наличие невозможно в бескислородных условиях. В ЮВБ было зафиксировано увеличение концентраций нитритов по направлению к берегу, что, вероятно, обусловлено наличием речного стока. Минимальные значения нитритов приурочены к поверхностному слою. Максимумы нитритов были зафиксированы на станциях, ближайших к устью рек. Средние значения концентраций нитритов в придонном слое ВчФЗ более, чем в 2 раза превышают таковые в ЮВБ (13,06 мкг/л и 5,79 мкг/л соответственно). Для ВчФЗ «язык» повышенных концентраций нитритов (от 12,5 мкг/л до 2,5 мкг/л) распространялся на глубине от 10 до 30 м на расстояние более 100 км от устья: сначала в придонном слое, затем в промежуточном. В ЮВБ повышенные концентрации нитритов приурочены к более глубокому слою – над галоклином.

Воды р. Невы содержат значительно меньшие концентрации фосфора относительно азота, и именно фосфор считается фактором, лимитирующим производство первичной продукции. Анаэробные условия у дна, характерные для всей Балтики, способствуют высвобождению фосфатов из их нерастворимых солей, что увеличивает их концентрацию в придонных водах. Кислородные условия, напротив, приводят к удерживанию фосфора донными отложениями и уменьшению его содержания [5].

Для поверхностного слоя обеих акваторий были характерны минимумы концентраций фосфора фосфатов вплоть до значений ниже порога количественного определения, что указывает на активную жизнедеятельность фитопланктона. Максимальное содержание фосфатов в ВчФЗ выше, чем в ЮВБ: 195,58 мкг/л и 163,95 мкг/л, соответственно. Максимумы концентрации фосфатов приурочены к слою воды с нулевыми значениями растворенного кислорода. В ЮВБ, в среднем,

концентрации фосфатов выше, чем в ВчФЗ, что связано с глубиной и мощностью бескислородного слоя. Для поверхности ситуация обратная, т.к. р. Нева, как источник дополнительных фосфатов, гораздо мощнее, чем р. Преголя. Для обоих исследуемых участков характерно наличие оторванного от дна максимума фосфатов.

Работа выполнена в рамках НИР №FZWM-2021-0015 «Временная изменчивость потоков углерода на карбоновом полигоне в Балтийском море», а также в рамках госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2021-0016).

Список литературы

- 1) HELCOM (2018): State of the Baltic Sea – Second HELCOM holistic assessment 2011-2016. Baltic Sea Environment Proceedings 155.
- 2) Гришина А. С. Влияние экологического состояния Куршского, Вислинского и Финского заливов на ихтиофауну // Земля и Человек. Актуальные вопросы современного состояния окружающей среды. – 2020. – С. 185-189.
- 3) Кондратьев С. А. Оценка современной биогенной нагрузки на российскую акваторию Финского залива и ее соответствие международным требованиям // "Научное обеспечение реализации" Водной стратегии Российской Федерации на период до. – 2020. – Т. 1. – С. 439.
- 4) Домнин Д. А., Горбунова Ю. А., Чубаренко Б. В. Анализ выноса биогенных веществ с водосбора реки Преголи при различных сценариях изменения климата // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения. Сборник научных трудов: посвящается Году экологии в России и 50-летию Института водных проблем РАН. Институт водных проблем РАН, Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр. – 2017. – С. 349-352.
- 5) Gustafsson, E., Savchuk, O. P., Gustafsson, B. G., & Müller-Karulis. Key processes in the coupled carbon, nitrogen, and phosphorus cycling of the Baltic Sea // Biogeochemistry. – 2017. – V. 134. – No 3. – P. 301-317.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОДОТОКОВ ЗАЛИВОВ ОГА, ЦИВОЛЬКИ, СЕДОВА (БЕРЕГ КАРСКОГО МОРЯ, НОВАЯ ЗЕМЛЯ): ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ И ВЛИЯНИЕ НА СТРУКТУРУ ВОД

Борисенко Г.В., Полухин А.А., Шармар В.Д.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: речной сток, Карское море, гидрохимия, биогенные элементы, Новая Земля.

В ходе проекта "Экосистемы российской Арктики" коллективом Института Океанологии исследовалось Карское море. Научной экспедиции в 2014-2016 гг. удалось произвести ряд высадок к берегам заливов Новой Земли, измерить содержание биогенных элементов в ручьях и реках, а также провести химический анализ вод в мористой части заливов [1]. Цель исследования - выявить особенности структуры вод заливов Цивольки, Ога, Седова и связь структуры с ветровой обстановкой. Работа основана на гидрохимических данных полученных в ходе рейсов НИС "Академик Мстислав Келдыш".

Отбор воды из водотоков производился во время высадок, отбор воды в мористой части залива производился непосредственно с судна. Точки отбора выбирались таким образом, чтобы охватить основные типы водотоков, впадающих в залив: реки, ручьи, сток из снежников.

Анализируемые параметры: концентрация нитратного азота, растворенных силикатов, общая титруемая щелочность, общая соленость, температура воды. Использовались стандартные международно признанные методики [2].

В 2014-2016 производились высадки на берег заливов Цивольки, Ога, Седова. Они относятся к заливам фьордового типа (узкие и глубокие), в заливах Цивольки и Ога находятся вывальные ледники "Серп и молот" и "Голубой" соответственно. Берега всех заливов сложены анкеритолитовыми сланцами.

Данные о скорости и направлении ветра в период проведения исследований получены с помощью реанализа ERA5. Эти данные использовались для изучения формирования структуры вод в исследованных заливах [3].

Концентрация нитратного азота в водотоках заливов равна 9-10 мкМ, растворенного кремния 8-9 мкМ, показатель общей щелочности находился на уровне 1.2-1.3 мг-экв/л. В заливах Цивольки, Седова, Ога наблюдались два основных типа гидрохимической структуры: 1) адвекция вод Карского моря, относительно бедных биогенными элементами (NO_3^- 0.5-1 мкМ, Si 1-2 мкМ) 2) формирование равномерного распределения кремния и нитратного азота в верхнем слое вод, в виде плюма.

Из реанализа ERA5 были выделены данные по скорости и направлению ветра в момент отбора проб (± 3 суток), сила и направление ветра влияют на перемещение верхнего слоя вод. Адвекция, по нашим сведениям, происходила в случае ветра юго-восточного направления, и силой более 4 м/с, в иных случаях адвекции вод Карского моря не происходило.

Финансирование осуществлялось по Государственному заданию Института Океанологии FMWE-2021-0007 и средствами гранта Президента (МК-4588.2021.1.5)

Список литературы

- 1) Флинт М.В., Поярков С.Г., Римский-Корсаков Н.А. Экосистемы российской Арктики-2015 (63-й рейс научно-исследовательского судна "Академик Мстислав Келдыш") //Океанология. – 2016. – Т. 56. – №. 3. – С. 499-501.
- 2) Grasshoff K., Kremling K., Ehrhardt M. (ed.). Methods of seawater analysis. – John Wiley & Sons, 2009.

- 3) Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2020. – T. 146. – №. 730. – C. 1999-2049.

ДИНАМИКА БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ДЕЯТЕЛЬНОМ СЛОЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В РАЙОНЕ

Г. ГЕЛЕНДЖИКА С 2020 ПО 2022 ГГ.

Бородулина П.А., Федоров А.В.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Черное море, биогенные элементы, кремний, минеральный фосфор, минеральный азот, деятельный слой.

Исследование межгодовых и сезонных изменений концентрации биогенных элементов необходимо для понимания многих процессов, происходящих в экосистеме Черного моря. Содержание биогенных элементов в деятельном слое моря в большинстве случаев является лимитирующим параметром для развития фитопланктона [1, 2, 3].

Целью данной работы является изучение динамики биогенных элементов, а также их стехиометрических соотношений, в верхнем 50-ти метровом слое северо-восточной части Черного моря в районе г. Геленджика в период с 2020 по 2022 гг.

Данные, использовавшиеся при исследовании динамики биогенных элементов, были получены при проведении рейсов на НИС «Ашамба». В этой работе использовался массив данных 35-ти мониторинговых экспедиций. При обработке данных были выбраны пробы с горизонтов от 0 до 50 метров по всем станциям, после чего рассчитывались медианные значения по каждой дате экспедиций, а затем вычислялись средневзвешенные концентрации биогенных элементов по сезонам и по годам. Отбор проб морской воды осуществлялся сразу после подъема измерительного комплекса на палубу. Аналитические определения концентраций биогенных элементов проводились в лаборатории химии Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН по стандартным гидрохимическим методикам:

- Нитратный азот – РД 52.24.523-2009;
- Нитритный азот – РД 52.24.518-2008;
- Аммонийный азот – РД 52.24.383-2005;
- Минеральный фосфор – РД 52.24.382-2006;
- Кремний – РД 52.24.432-2005.

На протяжении пяти лет (с 2017 по 2021 гг.) наблюдался тренд снижения концентрации кремния в деятельном слое моря [4]. Однако, в 2022 году среднегодовое содержание кремния резко увеличилось до почти 4,5 мкмоль/л. При рассмотрении межгодовой динамики содержания кремния по сезонам заметно выделяется летний период 2022 года, когда средняя концентрация составила 5,6 мкмоль/л. Таким образом, высокое среднегодовое содержание кремния в 2022 году обусловлено именно летним сезоном. Увеличение запасов кремния в верхнем 50-ти метровом слое моря отразилось на стехиометрических соотношениях биогенных элементов, а именно отношении содержания кремния к минеральному азоту и к минеральному фосфору. В течение всего исследуемого периода стехиометрические соотношения относительно близки к теоретическим значениям соотношения Рэдфилда [5] (1,4 и 23 соответственно), вновь за исключением лета 2022 года. Отношения кремния к азоту и кремния к фосфору превышали теоретические показатели примерно в 3,5 раза. Стоит отметить, что в 2021 году стехиометрические соотношения кремния к азоту и фосфору все же меньше, чем в теории. За весь исследуемый период с 2020 по 2022 год измеренные концентрации кремния находились в диапазоне 0,05 – 14,27 мкмоль/л.

Межгодовая динамика минеральных форм фосфора и азота на протяжении исследуемого периода можно назвать относительно стабильной. Концентрации минерального фосфора изменялись в пределах от 0,01 до 0,92 мкмоль/л, а минерального азота – от 0,22 до 6,33 мкмоль/л. Стоит отметить лишь содержание запасов азота и фосфора в 2021 году – среднегодовая концентрация минерального фосфора увеличилась на фоне снижения запасов минерального азота. При анализе средних за сезон концентраций видно, что рост содержания фосфатов приходится на осень 2020 года и заканчивается осенью 2021 года. В среднем концентрация фосфатов составляла около 0,8 мкмоль/л, в остальное же время среднее содержание минерального фосфора было 0,5 мкмоль/л. Концентрация минерального азота в течение 2020-2022 гг. составляла приблизительно 1 мкмоль/л, однако в весенне-летний период 2021 года снизилась до 0,74 мкмоль/л.

Минеральный азот является суммой содержания нитратного, нитритного и аммонийного азота. Наибольший вклад вносит аммонийный азот [5], динамика которого за 2020-2022 гг. имеет тренд на снижение. 2020 год отличался повышенными концентрациями (более 1 мкмоль/л). В 2021 и 2022 гг. содержание аммонийного азота было примерно одинаковым при рассмотрении сезонной динамики и составляло около 0,6 мкмоль/л. Диапазоны полученных значений для различных форм минерального азота были следующие: нитратный азот – от 0 до 4,01 мкмоль/л; нитритный азот – от 0 до 0,33 мкмоль/л; аммонийный азот – от 0,20 до 5,05 мкмоль/л.

Межгодовая динамика нитритного азота характеризуется постоянным повышением его концентрации. В динамике нитратного азота особенно выделяется 2021 год, а при рассмотрении сезонной динамики конкретно летний период, когда средневзвешенное содержание нитратов не поднималось выше аналитического нуля. Также в этом году, но в весенний период, среднее значение нитратного азота было максимальным за весь исследуемый промежуток времени и составило почти 0,4 мкмоль/л.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-17-00066

Список литературы

- 1) Ерофеева И.А., Михайлов В.А., Рогожин В.С., Самборский Т.В. Экологическое состояние вод Голубой бухты города Геленджик // Морские исследования и образование (MARESEDU-2017): Труды VI Международной научно-практической конференции, Москва, 30 октября – 02 ноября 2017 года. Москва: ООО «ПолиПРЕСС», 2017. С. 162-165.
- 2) Юнев О.А., Коновалов С.К., Великова В. Антропогенная эвтрофикация в пелагической зоне Черного моря: долговременные тренды, механизмы, последствия. - Москва: ГЕОС, 2019. - 164 с. DOI: 10.34756/GEOS/2019.16.37827
- 3) Силкин В.А., Прокопов О.И., Паутова Л.А., Микаэлян А.С., Часовников В.К., Лукашева Т.А. Климатические изменения и факторы, лимитирующие развитие фитопланктона // Комплексные исследования Черного моря. - Москва: "Научный мир", 2011. - С. 269-284.
- 4) Часовников В.К., Бородулина П.А. Тенденции межгодовой изменчивости биогенных элементов в северо-восточной части Черного моря по данным судовых наблюдений за 2017-2021 гг. // Экология гидросферы. 2022. № 2 (8). С. 37-46. URL: <http://hydrosphereecology.ru/368> DOI: [https://doi.org/10.33624/2587-9367-2022-2\(8\)-37-46](https://doi.org/10.33624/2587-9367-2022-2(8)-37-46)
- 5) Микаэлян А.С., Силкин В.А., Паутова Л.А. Развитие кокколитофорид в Черном море: межгодовые и многолетние изменения // Океанология. 2011. Т. 51, № 1. С. 45-53.

ХЛОРОРГАНИЧЕСКИЕ ТОКСИКАНТЫ В МОРСКОЙ ВОДЕ И ВЗВЕШЕННОМ ВЕЩЕСТВЕ В ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА

Войцеховская В.В., Малахова Л.В.

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: хлорорганические токсиканты, вода, взвесь, Чёрное море.

Высокотоксичные загрязняющие хлорорганические соединения (ХОС), дихлордифенилтрихлорметилметан (ДДТ) и полихлорбифенилы (ПХБ), начиная с 80-х годов прошлого века и до настоящего времени обнаруживаются во всех компонентах экосистемы Чёрного моря, несмотря на запрет их использования в конце 20-го века. Антропогенное происхождение данных токсикантов дает основание предполагать, что наиболее уязвимыми к загрязнению ХОС относятся прибрежные акватории, где активно ведется деятельность человека. Таковыми являются морские районы Южного берега Крыма, где расположены источники поступления ХОС: судоходство, речной, коммунальный, ливневый, терригенный стоки, селевые потоки и рекреационная деятельность. Время пребывания ХОС в водной массе моря может достигать 30 лет, при условии, если их элиминация будет обусловлена только процессом биоседиментации [1]. Как правило, в воде определяют общее содержание ХОС без разделения на растворенную и взвешенную форму. Однако растворенные и сорбированные на взвеси ХОС могут оказывать различное действие на гидробионты. Со взвесью токсиканты выводятся из водной среды в донные отложения, что делает их менее доступными для пелагических гидробионтов, но при этом более доступным для бентосных организмов [2]. Исследования ХОС в Чёрном море проводят более 30 лет в отделе радиационной и химической биологии Института биологии южных морей РАН. В последние годы с 2010 по 2020 гг. в открытых районах Чёрного моря определен тренд снижения в воде содержания ДДТ и метаболитов ДДД и ДДЭ, в которые преобразуется ДДТ со временем [3]. Однако даже при невысоких концентрациях ХОС в воде, они накапливаются в гидробионтах и преобладание исходных веществ над их метаболитами, указывает на то, что ХОС продолжают поступать в экосистему моря в настоящее время. Связано это может быть с утечками с мест хранения устаревших пестицидов и электрохимического оборудования, в котором применялись ПХБ, со смывом с сельскохозяйственных территорий, поступлением с атмосферными осадками из южных широт, где до сих пор разрешено применять, например, ДДТ. Целью настоящего исследования было изучение содержания и распределения ХОС в воде и взвешенном веществе Чёрного моря в ноябре 2022 г. Пробы были отобраны в первом этапе 125-го рейса ЦКП НИС “Профессор Водяницкий” вдоль Южного берега Крыма от бухты Ласпи до Феодосийского залива. Всего было отобрано 8 проб воды и 8 проб взвеси. Количество взвешенного вещества определяли гравиметрическим методом в соответствии с РД 52.24.468-2019. В пробах воды ХОС определяли методом газовой хроматографии в соответствии с руководством [4]. Для определения ХОС во взвешенном веществе использовали методику РД 52.24.417-2011. Предварительно морскую воду фильтровали через подготовленные (промытые гексаном) высушенные до постоянного веса при 50°C нитроцеллюлозные мембранные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм (MF-Millipore). Суть методов определения ХОС состоит из их экстракции из объектов исследования неполярным гексаном, очистки экстрактов от мешающих полярных веществ концентрированной серной кислотой, концентрирования экстрактов и качественного и количественного определения ХОС методом газовой хроматографии с детекторами электронного захвата. Анализ проводили в ЦКП “Спектрометрия и Хроматография” ФИЦ ИнБЮМ на газовом хроматографе “Кристалл 5000” (Хроматэк, Россия) с микро детектором электронного захвата и капиллярной колонкой длиной 30 м, диаметром 0.32 мм, толщиной неподвижной фазы CR-5 0.25 мкм. Для построения калибровочных характеристик использовали СО состава пестицидов 4,4'-ДДТ, 4,4'-ДДД

и 4,4'-ДДЭ (ООО "НПАЦ ЭКОЛАН") и СО шести индикаторных конгенов ПХБ (по номенклатуре IUPAC): 28,52,101,138,153,180 (Sigma Aldrich, Germany).

Результаты показали, что ПХБ были обнаружены во всех пробах воды, а ДДТ и его метаболиты - в половине проб. Концентрация суммы шести индикаторных конгенов ПХБ (Σ 6ПХБ) в воде изменялась от 0.57 до 4.15, в среднем составляя 1.72 нг/л, суммы ДДТ и метаболитов (Σ ДДТ) - от 0.04 до 2.77, в среднем - 1.06 нг/л. Превышений по ПДК ХОС в морской воде, составляющей 10 нг/л, не выявлено. Максимальная концентрация как Σ 6ПХБ, так и Σ ДДТ, была обнаружена в поверхностном горизонте воды Феодосийского залива. В этом районе был найден исходный пестицид ДДТ, что свидетельствует о его недавнем поступлении в акваторию, в бухте Ласпи ДДТ и метаболиты не найдены, в других районах обнаружены только метаболиты ДДЭ и ДДД. Содержание взвеси в воде изменялось от 2.37 до 5.20, в среднем составило 3.49 мг/л. Наибольшее количество взвешенного вещества было определено в районе глубоководной станции (1300 м) в 11.5 милях от Судака на горизонте отбора 100 м. По данным гидроакустического зондирования для данной станции в этом слое был зафиксирован максимум звукорассеивания. Во взвешенном веществе определены только пента-, гекса- и гептахлорбифенилы (101,138,153,180), сумма их концентраций изменялась от 4.63 до 23.45, и в среднем составила - 10.16 нг/г взвеси, а ДДТ и его метаболиты обнаружены не были. Отсутствие группы пестицида ДДТ и низкохлорированных ПХБ в пробах взвеси может быть связано как с особенностями строения молекул данной группы веществ, что делает её менее способной к адгезии по отношению к взвешенным частицам, так и другими факторами. Таким образом, несмотря на запреты использования, ХОС обнаруживаются в воде прибрежных экосистем Крыма. Неравномерное пространственное распределение ХОС как в растворенной форме, так и во взвеси, говорит о их возможных локальных источниках поступления.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ФИЦ ИнБЮМ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (№ 121031500515-8).

Список литературы

- 1) Мошаров С.А. Характеристика биогенной седиментации в Балтийском и Чёрном морях: автореферат дис. ... канд. биол. наук – М.: 1996. – 26 с.
- 2) Besseling E. et al. Effects of microplastic on fitness and PCB bioaccumulation by the lugworm *Arenicola marina* (L.) // *Environmental science & technology*. – 2013. – Т. 47. – №. 1. – С. 593-600.
- 3) Малахова Л. В. и др. Содержание хлорорганических соединений в компонентах экосистемы реки Черной и оценка их выноса в Севастопольскую бухту в зимний сезон 2020 года // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2020. – №. 5. – С. 7-14.
- 4) ПНД Ф. 14.1: 2: 3: 4.204-04 Методика измерений массовых концентраций хлорорганических пестицидов и полихлорированных бифенилов в пробах питьевых, природных и сточных вод методом газовой хроматографии (издание 2018 г.) // Утверждена директором ФГБУ «Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия» Юранец В. Ч. – 2018. – Т. 31. – С. 4.204-04.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ШЕЛЬФА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Гурова Ю.С., Гуров К.И., Орехова Н.А.

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: донные отложения, поровые воды, кислород, органический углерод, полярография, Черное море.

К критериям оценки экологического состояния морских экосистем относятся концентрация кислорода в придонном слое вод и верхнем слое донных отложений, содержание органического вещества и гранулометрический состав отложений. Также на экологическую обстановку оказывает влияние динамика вод – стратификация водной толщи и затрудненный водообмен ограничивают поток кислорода в осадки, что способствует развитию его дефицита и возникновению зон экологического риска.

Район северо-восточной части Черного моря – это участок от Таманского полуострова до г. Адлер, отличается интенсивной динамикой вод и изменчивостью прибрежных течений [1, 2].

Для северо-восточного побережья характерно развитие рекреационной и санитарно-курортной деятельности, в результате чего, темпы освоения прибрежной полосы постоянно растут [3]. Также поступлению в прибрежные экосистемы дополнительного количества органического вещества и биогенных элементов способствует воздействие антропогенного фактора. Это приводит к увеличению темпов осадконакопления и определяет высокую скорость изменения характеристик прибрежных акваторий.

Целью работы являлось рассмотрение особенности вертикального распределения геохимических и гидрохимических параметров, а также химического профиля поровых вод донных осадков прибрежной зоны северо-восточной части Черного моря.

В работе приведены результаты анализа проб придонного слоя вод и поверхностного слоя (0 – 5 см) отложений, отобранных в сентябре 2018 г. и июле 2019 г., а также колонок донных отложений, отобранных в августе 2021 г.

Пробы морской воды из придонных горизонтов для химического анализа отбирались с помощью батометров. Пробы верхнего слоя (0–5 см) отложений отбирались с помощью дночерпателя Петерсона. Колонки донных отложений отбирались с помощью ручного пробоотборника в виде акриловой грунтовой трубки (внутренний диаметр 60 мм) с вакуумным гидрозатвором.

Для изучения вертикальной структуры осадка и получения химического профиля поровых вод использовался полярографический метод анализа со стеклянным Au – Hg микроэлектродом [4, 5]. Далее колонки донных отложений разделяли на слои толщиной 1–2 см с помощью ручного экстрадера и кольца из акрила для анализа физико-химических характеристик. Гранулометрический состав донных отложений определяли комбинированным методом декантации и рассеивания. Содержание органического углерода ($C_{орг}$) определяли кулонометрически на экспресс-анализаторе – АН 7529 по методике, адаптированной для морских донных отложений [6, 7].

Поверхностный слой осадка в северо-восточной части был образован преимущественно илистым материалом (средняя доля – 79%). Повышенная доля крупнозернистого гравийно-песчаного материала была распределена на мелководье в районе Керченского предпролива и в районе г. Анапа. Повышенная доля мелкодисперсной илистой фракции (83 – 97%) отмечалась в районах впадения крупных рек Краснодарского края (Пшада, Туапсе, Сочи, Мзымта).

Содержание $C_{орг}$ в поверхностном слое осадка изменялось от 0,2 – 0,5% до 1,9% сух. масс.

Полученные данные вертикального распределения основных компонентов поровых вод позволили выделить районы, в которых донные отложения формировались в аэробных, субкислородных и анаэробных условиях. На большинстве прибрежных станций преобладали аэробные условия.

При этом в более глубоких слоях условия в осадке изменялись от субкислородных (район г. Анапа и на участке между г. Геленджик и г. Туапсе) до анаэробных (район г. Новороссийск и г. Туапсе).

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением глубины уменьшалась степень насыщения вод кислородом, увеличивалась доля мелкодисперсной пелито-алевритовой фракции и содержание $C_{орг}$ в осадке. Исключением стали мелководные акватории.

Распределение $C_{орг}$ по глубине было неоднородно, что может быть следствием неоднородного поступления органического вещества. Максимальные концентрации наблюдались в верхнем (0 – 4 см) слое, была отмечена тенденция к снижению концентрации с глубиной, за исключением станций, расположенных вблизи г. Анапа.

Установлено, что содержание в поровых водах Fe(II, III) было обратно пропорционально величине рН осадка. Это указывает на то, что наличие кислорода, растворенного железа и других окислительно-восстановительных компонентов в осадке определяют формирование окислительно-восстановительных условий в донных отложениях, что также можно подтвердить данными физико-химических характеристик.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме FNNN-2021-0005 «Прибрежные исследования».

Список литературы

- 1) Циркуляция вод в северной части черного моря летом – зимой 2018 года / Ю. В. Артамонов [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 1. С. 69–90.
- 2) Изучение гидродинамических процессов в шельфовой зоне на основе спутниковой информации и данных подспутниковых измерений / О. Ю. Лаврова [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 98–129.
- 3) Исследование состояния экосистемы прибрежной части Черного моря в районе большого Сочи // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2008. № 5. С. 6-25.
- 4) Орехова Н. А., Коновалов С. К. Полярография донных осадков Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 2. С. 52–66.
- 5) Luther III G. W. Use of voltammetric solid-state (micro)electrodes for studying biogeochemical processes: Laboratory measurements to real time measurements with an in situ electrochemical analyzer (ISEA) // Marine Chemistry. 2008. 108 (3-4). P. 221–235.
- 6) Люцарев С. В. Определение органического углерода в морских донных отложениях методом сухого сжигания // Океанология. 1986. Т. 26, Вып. 4. С. 704–708.
- 7) Забегаев И. А., Шульгин В. Ф., Орехова Н. А. Применение инструментальных методов анализа донных отложений для экологического мониторинга морских экосистем // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского Биология. Химия. 2021. Т. 7 (73), № 4. С. 242–254.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ГЛУБОКОВОДНЫХ ПРОХОДАХ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ АТЛАНТИКИ ПО ДАННЫМ 2022 Г.

Двоеглазова Н.В.^{1,2}, Муратова А.А.^{1,2}, Пономаренко Е.П.¹, Пугачёва Т.Л.^{1,2},
Баширова Л.Д.^{1,2}, Кулешова Л.А.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

Ключевые слова: растворенный кислород, биогенные элементы, взвешенное вещество.

Котловины Мирового океана соединены глубоководными проходами, контролирующими пространство придонных и глубинных водных масс. Эти узкие каналы имеют ключевое значение в обмене вод, тепла и химических элементов между океаническими бассейнами. Данная работа посвящена изучению гидрохимических параметров в относительно слабоизученных районах субтропической, субэкваториальной и экваториальной Атлантики на 4 полигонах: в глубоководных проходах Западном, Дискавери и Кейн, а также в трансформном разломе Романш. Материалом для исследования послужили данные натурных измерений, полученные в 62 рейсе ПС «Академик Иоффе» (июль–сентябрь 2022).

Для всех полигонов измерения гидрохимических параметров производились в поверхностном и в придонном слоях. Отбор проб воды осуществлялся батометрами Hydro-bios и Химлаб системы Нискина, объемом 5 и 10 л. Отобранные пробы анализировались на содержание растворенного кислорода, минерального кремния и фосфора, а также концентрацию взвешенного осадочного вещества по стандартным методикам, принятым в отечественной практике [1].

Пространственная изменчивость концентраций растворенного кислорода для всех полигонов соответствует общим закономерностям распределения кислорода в районах исследования [2]: наблюдается повышение концентраций с понижением температуры от экватора к полюсам. Так, концентрации во всех структурных зонах нарастают от минимальных на полигоне Романш (4,94 мл/л — на поверхности и 5,41 мл/л — на дне) до максимальных на полигонах Западном и Дискавери (в среднем — 5,28 мл/л — на поверхности и 5,73 мл/л — на дне). Кроме того, на всех исследуемых полигонах зафиксированы минимальные значения растворенного кислорода в пограничном слое (1,01–3,00 мл/л), разделяющем поверхностную и промежуточную водные массы (600–1200 м), что, возможно, связано с ограниченным вертикальным перемешиванием вод, а также большим расходом растворенного кислорода для окисления осаждающихся органических и минеральных веществ [2].

Концентрации фосфора и кремния можно охарактеризовать классическим вертикальным распределением: по мере удаления от более продуктивного поверхностного слоя ко дну количество питательных солей резко увеличивается, это обусловлено интенсивным потреблением биогенных элементов фитопланктоном в верхнем фотическом слое мощностью 100–200 м.

На всех полигонах зафиксировано крайне низкое содержание минерального фосфора, что соответствует литературным данным [2]. На поверхности значения варьируют в пределах от 0 до 0,18 мкмоль/кг (полигон Романш), в нижнем слое поверхностной структурной зоны (600–800 м) значения концентрации увеличиваются до 1,03 мкмоль/кг (одинаково для полигона Западного и Дискавери), в придонном слое значения достигают 1,99 мкмоль/кг на глубине 4906 м самого глубоководного полигона Романш.

Содержание растворенного кремния изменяется в более широком диапазоне, чем минеральный фосфор. На северных полигонах (проходы Западный и Дискавери) концентрации достигают 42,5–42,6 мкмоль/кг. На южном и глубоководном полигоне Романш содержание растворенного кремния

выше: до 76,0–93,6 мкмоль/кг на глубинах 4700–5862 м. Таким образом, продвигаясь к северу, донная вода претерпевает процесс трансформации и становится менее насыщенной биогенными элементами.

Концентрации взвешенного осадочного вещества характеризовались относительно однородным горизонтальным распределением в пределах изученных полигонов как в придонном, так и в поверхностном слое. Однако средние значения концентраций взвеси для всех полигонов в поверхностном слое (0–160 м) были в три раза выше 0,09 мг/л, чем в придонном слое (4400–5900 м) – 0,03 мг/л. Максимальные значения концентрации взвешенного вещества (в основном биогенного) сосредоточены в поверхностном слое за счет того, что в процессе седиментации взвесь минерализуется. Поэтому увеличения концентрации в придонном слое практически не происходит.

Таким образом, летом 2022 года в северной части Атлантического океана пространственное распределение изученных химических элементов было неравномерным. Зафиксирована стратификация по глубине. Общая схема вертикальной изменчивости была следующей: у поверхности океана минимальны концентрации биогенных элементов (фосфора и кремния), а значения кислорода, напротив, —максимальны. В промежуточном слое происходит снижение концентраций кислорода до минимума, далее увеличиваясь с глубиной, но наблюдается рост концентраций биогенных веществ, продолжающийся до придонных горизонтов. Выявленная горизонтальная изменчивость соответствовала широтной зональности.

Работа выполнена в рамках госзадания ИО РАН (тема №FMWE-2021-0012).

Список литературы

- 1) Современные методы гидрохимических исследований океана / Ред. Бордовский О.К., Чернякова А.М. М.: ИО АН СССР, 1992 – 200 с.
- 2) Степанов В.Н. Мировой океан: динамика и свойства вод. – Знание, 1974. – 256 с.

ОСОБЕННОСТИ ПУЗЫРЬКОВОГО ПЕРЕНОСА МЕТАНА В ЧЕРНОМ МОРЕ

Заговенкова А.Д.¹, Малахова Т.В.², Архипкин В.С.¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: цикл метана, пузырьковый перенос, математическое моделирование.

Многочисленными исследованиями было подтверждено широкое распространение струйных пузырьковых газовыделений (сипов) в морях России. Открытие сипов в Черном море состоялось во время рейса НИС «Профессор Водяницкий» в 1989 году [Егоров, 2011]. Пузырьковый газ сипов состоит преимущественно из метана, который является важнейшим парниковым газом. Метан оказывает существенное влияние на газовый состав и гидрохимические характеристики воды, а также на структуру и активность микробного сообщества метанового цикла. Именно поэтому задача количественной оценки потоков метана от донных источников в водную толщу и атмосферу является актуальной.

Для количественной оценки поступления метана в толщу воды от пузырькового сипа была разработана математическая модель [2], основанная на уравнении состояния идеальных газов, учитывающая термохалинную структуру вод [5]. Входными данными для расчетов являлись начальная глубина сипа, средние климатические данные World Ocean Atlas NOAA по температуре и солености, а также натурные данные о распределении и концентрациях растворенного в воде метана, полученные по результатам 102 рейса на НИС «Профессор Водяницкий» [4]. Для подсчета интегрального потока метана, переходящего от пузырей в воду учитывалась частота газовыделений и размерный спектр выделяющихся пузырей, радиусом до 8 мм [3]. Для пузырей различных размеров были рассчитаны радиус, содержание метана, коэффициент массопереноса на отдельных горизонтах (шаг по вертикали составлял 1 м). Эти параметры использовались для расчета потока метана от сипа в воду.

Эволюция динамических характеристик происходит под влиянием двух основных процессов: диффузионного оттока газа в водную толщу и изменения гидростатического давления. Результаты показали, что при подъеме с небольших глубин (до 300 м) пузыри достигают границы вода-атмосфера и большая часть метана способна поступать в атмосферу. При подъеме со значительных глубин (более 300 м) пузыри достигают нулевого значения радиуса, а весь метан переходит в растворенное состояние. Наибольшие значения потока метана в водную толщу наблюдаются непосредственно у дна, далее он постепенно снижается за счет уменьшения диффузионного оттока и растворения пузырей, имеющих минимальный радиус. Подобный тип вертикального распределения метана над действующим сипом, который характеризовался повышенными относительно фона концентрациями метана в воде и значительным максимумом в придонном слое, показан для района струйных газовыделений в восточной части Черного моря [6].

Таким образом, явление струйных газовыделений представляет собой важный средообразующий фактор, обеспечивающий существенно более быстрый, по сравнению с диффузионным переносом, механизм поступления природного метана из литосферы в гидросферу и атмосферу. Количественная оценка потоков пузырькового и растворенного метана в морских экосистемах при помощи представленной методики может быть применена практически к любой акватории, что делает ее пригодной для дальнейшего использования в биогеохимических моделях акваторий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00379, <https://rscf.ru/project/23-27-00379/>

Список литературы

- 1) Архипкин В.С. Алгоритмы и программы на Фортране по обработке океанологической информации – Московский Университет, Москва, 1992
- 2) Leifer I., and R. K. Patro. The bubble mechanism for methane transport from the shallow sea bed to the surface: A review and sensitivity study // *Cont. Shelf Res.* – 2002. – 22. – P. 2409–2428.
- 3) Reeburgh W.S. Oceanic Methane Biogeochemistry // *Chem. Rev.* – 2007 – 107. – P. 486–513.
- 3) Егоров В. Н., Артемов Ю. Г., Гулин С. Б. Метановые сипы в Черном море: средообразующая и экологическая роль // ИнБЮМ НАНУ, Под ред. Г.Г. Поликарпова. / – Севастополь. – НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2011. – 405 с.
- 4) Малахова Т. В. и др. Особенности распределения метана в эвфотическом слое северной части Черного моря в летний сезон 2018 года (по данным 102-го рейса НИС «Профессор Водяницкий») // *Морской гидрофизический журнал.* – 2020. – Т. 36. – №. 2 (212). – С. 186-201.
- 5) McGinnis D. F. et al. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* – 2006. – Т. 111. – С. 09007.
- 6) Grilli R. et al. Inter-Comparison of the Spatial Distribution of Methane in the Water Column From Seafloor Emissions at Two Sites in the Western Black Sea Using a Multi-Technique Approach // *Frontiers in Earth Science.* – 2021. – Т. 9. – С. 626372.

СООТНОШЕНИЕ МОРСКИХ И ПРЕСНЫХ ВОД В ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ПОС КАРСКОГО МОРЯ

Казакова У.А.^{1,2}, Полухин А.А.²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: поверхностный опресненный слой, речной сток, щелочность, растворенный кремний, Карское море.

В Карское море поступает более половины всего объема речного стока рек, впадающих в моря Северного Ледовитого океана. Поступающие речные воды образуют так называемый поверхностный опресненный слой (ПОС), который распространяется по акватории моря под воздействием различных гидрометеорологических факторов [1]. Воды впадающих в море крупных рек, таких как Обь и Енисей, на долю которых приходится более 80% речного стока Карского моря, взаимодействуют как с морскими водами, так и между собой, образуя сложную структуру ПОС [2]. Обские и енисейские воды различаются между собой по величине различных гидрохимических параметров [3], в частности, щелочности и содержанию растворенного кремния [4]. Помимо речного стока в формирование ПОС вносят вклад воды, образованные при таянии морского льда [5].

Основная цель работы – определение соотношения морских и пресных вод разного происхождения в ПОС до пикноклина с использованием гидрохимических параметров.

В работе использованы данные, полученные в ходе экспедиций Института океанологии имени П.П. Ширшова РАН в Карское море в период с 2015 по 2021 гг. Все гидрохимические параметры были обработаны в соответствии со стандартными методами [6].

Для сравнительного анализа соотношения морских и различных пресных вод данные гидрохимической съемки интерполировались на стандартные горизонты с интервалом 5 м. Далее для определялось среднее значение параметра (соленость, щелочность, кремний) для столба воды.

Расчет процентного вклада вод разного происхождения был проведен для каждого столба воды при решении системы уравнений, включающих уравнения линейного смешения и уравнение баланса.

Для анализа поступающего объема речного стока были использованы данные о среднемесечном расходе рек Оби и Енисея, которые были взяты с портала ArcticGRO (<https://www.arcticrivers.org/>). Вклад талых вод в формирование ПОС был сопоставлен с данными о ледовых условиях Карского моря. Эта информация была получена с использованием обзорных ледовых карт СЛЮ (<http://www.aari.nw.ru/>). Для анализа распределения талых вод была использована информация о времени таяния, площади распространения и сплоченности ледяного покрова.

В результате решения системы уравнений были получены величины процентного вклада вод Оби, Енисея и талых вод в ПОС Карского моря.

Использование гидрохимических параметров позволило дать количественную оценку структуре ПОС. Полученные величины могут быть использованы при анализе распространения речного плюма и взаимодействия речного стока с морскими водами.

Исследование выполнено в рамках государственного задания НИР Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (тема № FMWE-2021-0007).

Список литературы

- 1) Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Поярков С.Г., Соловьев Д.М. Поверхностный опресненный слой в Карском море //Океанология. 2010. Т. 50. №5. С. 698-708.

- 2) Osadchiev A.A., Frey D.I., Shchuka S.A., Tilinina N.D., Morozov E.G., Zavalov P.O. Structure of the freshened surface layer in the Kara Sea during ice-free periods //Journal of Geophysical Research: Oceans. 2020. Vol. 126. e2020JC016486. doi:10.1029/2020JC016486.
- 3) Пивоваров С.В. Химическая океанография арктических морей России. – СПб, Гидрометеоздат, 2001. 88 с.
- 4) Стунжас П.А. Разделение вод Енисея и Оби в Карском море по щелочности и кремнию //Океанология. 1995. Т. 35. № 2. С. 215–219.
- 5) Полухин А.А., Маккавеев П.Н. Особенности распространения материкового стока по акватории Карского моря //Океанология. 2017. Т. 57. №1 С. 25-37.
- 6) Современные методы гидрохимических исследований океана / Ред. О.К. Бордовский, В.Н. Иваненков. М.: АН СССР. Ин-т Океанологии. 1992. 200 с.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОХИМИИ РАННЕГО ДИАГЕНЕЗА В ПОВЕРХНОСТНЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОХОТСКОГО МОРЯ

Киль А.О., Семенов П.Б., Малышев С.А., Шатрова Е.В., Яржембовский Я.Д.

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Охотское море, метан, диagenез, поровая вода, ионный состав.

Восточный склон Сахалина является перспективным районом на углеводородное сырье, в прибрежной части которого обнаружены нефтяные и газовые месторождения. Важными для выявления нефтегазоносных участков являются газогеохимические исследования донных осадков, которые позволяют выявить по количеству и характеру распределения газов зоны разгрузки флюидов из глубокозалегающих горизонтов. Также в пределах данной акватории встречаются проявления газовых гидратов и существует пространственная корреляция газогидратов с нефтегазоносными отложениями.

В ходе геолого-съёмочных работ в 2022 году в южной части Восточно-Сахалинского склона экспедиционным отрядом ФГБУ «ВНИИОкеангеология» был проведен геохимический пробобор. Поддонные глубины опробования от первых сантиметров до 296 см. Отобрано 142 пробы газовой смеси из донных осадков парофазным методом headspace и 53 пробы поровой воды из разных горизонтов керна путем центрифугирования донных осадков и пропускания через фильтр 0,45 мкм.

Донные отложения опробованных станций в основном представлены алевропелитами, реже пелитами, алевритами, также встречаются песчаные осадки. На сейсмических профилях были заметны небольшие акустические аномалии. Можно выделить фронты флюидоразгрузки, которые не подходят к поверхности морского дна, но где может происходить просачивание флюидов.

После рейса газогеохимические исследования проводились в Химико-спектральной лаборатории. Газовая фаза анализировалась с помощью газового хроматографа Shimadzu GC 2014. Разделение углеводородных компонентов осуществлялось на капиллярной колонке при температуре 100°C, а регистрировались они с помощью пламенно-ионизационного детектора. Для углеводородных газов использовались 2 насадочные колонки, одна была заполнена Porapak N, другая цеолитами NaX (13X) или CaA (5A). Регистрация углеводородных газов осуществлялась с помощью детектора по теплопроводности. В качестве газа носителя использовался аргон (Ar). Для анализа на катионы и анионы использовался ионный хроматограф Metrohm 940 Professional IC Vario с кондуктометрическим детектором.

По химическому составу поровые воды хлоридно-натриевые с коэффициентом метаморфизации (r_{Na^+}/r_{Cl^-}) 0,47-1,05. Минерализация полученных образцов изменяется от 21,55 до 32,49 г/л с содержанием хлор-иона 10,50-18,93 г/л. Содержание сульфат-иона в поровой воде донных осадков изменяется в пределах 1,22-2,86 г/л, а коэффициент $r_{SO_4^{2-}}/r_{Cl^-}$ находится в диапазоне 0,07-0,16. Концентрации брома (Br^-) составляют 0,03-0,06 г/л с коэффициентом r_{Br^-}/r_{Cl^-} равным 0,003 для всех образцов. Во всех образцах в составе обменного комплекса катионов следующая последовательность концентраций: $Na^+ > Mg^{2+} > K^+ > Ca^{2+}$. Содержание их в поровых водах составляет 8,39-14,39, 1,06-1,64, 0,43-0,74 и 0,36-0,55 г/л соответственно. Распреснения вод не происходит, из чего можно сделать вывод, что в осадках нет газовых гидратов или не происходит их дестабилизации.

Концентрации растворенного метана опробованных осадков варьируют от 2 ppm до 232 ppm. Значения индекса влажности углеводородных газов в основном менее 5%, что характерно для преимущественно микробного источника этих газов [1]. В осадках большинства станций концентрации метана увеличиваются с глубиной, маркируя восходящий диффузионный поток метана. Градиенты концентрации метана в пределах опробованных разрезов неодинаковы на разных станциях, что

говорит о различных потоках метана. Так, на станции 39Т количество метана незначительно увеличивается с глубиной (от 3,9 ppm до 13,7 ppm) по сравнению со станцией 12Т, где концентрации метана достигают 232 ppm на интервале 280 см. Кривые распределения метана и сульфата демонстрируют сульфат-метановый интерфейс, характерный для анаэробного окисления метана за счет восстановления сульфата, предусматривающий линейные противоположно направленные градиенты концентраций CH_4 и SO_4^{2-} [2]. В пределах опробованных разрезов фиксируется сульфат-метан транзитная зона, которая четко разграничивает зону сульфат редукации и зону метаногенеза.

Изменение концентраций метана с глубиной иллюстрирует вариации потоков метана в «фоновых обстановках» диагенеза на акватории опробованного участка Охотского моря и может быть использовано для количественных расчетов диффузионных потоков и моделирования процессов раннего диагенеза в стационарных условиях. Полученные данные по химическому составу поровых вод свидетельствуют об отсутствии явно выраженных гидрохимических признаков разгрузки флюидов из глубинных источников и косвенно указывают на преимущественное постоянство условий осадконакопления и диагенеза в исследуемой области.

Список литературы

- 1) Abrams M.A. Significance of hydrocarbon seepage relative to sub-surface petroleum generation and entrapment. // Mar. Petrol. Geol. Bull. Vol. 22. 2005. P. 457–478.
- 2) Jorgensen B., Weber A., Zopfi J. Sulfate reduction and anaerobic methane oxidation in Black Sea sediments. // Deep-Sea Research, Vol. I 48. 2001. P. 2097-2120.

ПРИДОННЫЕ ВОДЫ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧУКОТСКОГО МОРЯ В АВГУСТЕ 2019 Г.

Кодрян К.В., Кивва К.К.

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Москва

Ключевые слова: Чукотское море, атлантическая водная масса, биогенные элементы, содержание кремния.

Чукотское море (ЧМ) является одним из наиболее высокопродуктивных арктических морей, в то же время его западная часть довольно слабо изучена. ЧМ имеет уникальное положение, так как является транзитной зоной, через которую богатые биогенными элементами тихоокеанские воды попадают в Северный Ледовитый океан (СЛО). На экосистему ЧМ огромное влияние оказывают климатические изменения. Повышение температуры вод, сокращение длительности ледового периода, увеличение потока тихоокеанских вод в ЧМ – все это приводит к изменениям величины годовой ПП, к перераспределению областей наиболее высокой продукции органического вещества в пространстве и сдвигам в сезонной динамике развития сообществ фитопланктона, а также к постепенному изменению биотопов и биоценозов моря и повышению рыбохозяйственного потенциала ЧМ.

В 2019 году состоялась трансарктическая экспедиция на НИС «Профессор Леванидов», во время которой с 11 по 29 августа проводились как гидрологические, так и гидрохимические исследования на 55 станциях в ЧМ. Гидрохимический анализ включал определения содержания растворенного кислорода, минеральных соединений фосфора, кремния, нитритного, нитратного и аммонийного азота, выполненные по стандартным методикам.

Комплексная съемка проводилась по всей акватории западной (российской) части моря, однако наиболее интересные данные были получены в северной более глубоководной части ЧМ. На трех станциях к северу и северо-востоку от о. Врангеля в придонном слое на 117–137 м была обнаружена водная масса атлантического происхождения, что является нехарактерно близким к поверхности расположением для нее: обычно относительно теплые и соленые атлантические воды (АВ) наблюдаются на горизонтах глубже 150 м. Необычными особенностями этой трансформированной атлантической ВМ в 2019 г. были нехарактерно высокие для АВ значения концентрации минерального кремния (93–97 μM), низкие значения концентрации растворенного кислорода при высоких значениях кажущегося потребления кислорода (КПК) (240–270 μM), и нехарактерно низкие значения N^* (величина избытка фиксированного минерального азота относительно фосфора) (до $-24,0 \mu\text{M}$). Максимум кремния сопровождался высоким содержанием нитратного азота (15,67–19,14 μM) и фосфатов (2,26–2,95 μM). В то же время АВ на горизонтах глубже 140 м не имела такой высокой концентрации кремния (17,27–52,95 μM) и абсолютное и относительное содержание кислорода в этих водах также было выше (3,3–5,5 мл/л и 42–68 %, соответственно).

Высокие концентрации кремния наблюдались также в Чукотском море к северу и северо-западу от о. Врангеля на станциях, глубина которых не превышала 70 м, а также в северной части Восточно-Сибирского моря. Концентрация кремния в придонном слое в этом районе находилась в диапазоне от 83 до 108 мкМ и была приурочена к водам с соленостью от 32,4 до 32,7 ‰ и. Помимо высокого содержания кремния эти воды характеризовались высоким содержанием азота нитратов (12,33–14,39 мкМ) и фосфора фосфатов (от 2,33 до 3,10 мкМ), а также высокими значениями КПК (до 213 μM) и низкими значениями N^* (до -28 мкМ). Эти воды по гидрологическим параметрам ($S \approx 32,6 \text{ ‰}$ и $T \approx -1,5^\circ\text{C}$) имеют характеристики ОЗВ, а значит имеют тихоокеанское происхождение.

Высокое содержание биогенных элементов и низкое содержание растворенного кислорода обычно указывают на то, что в этих районах происходит минерализация органического вещества. Вы-

сокий КПК и низкие N^* позволяют заключить, что механизм накопления минерального кремния в обоих случае происходит за счет обмена с поровыми водами донных осадков. А дефицит нитратов относительно фосфатов (о чем свидетельствуют отрицательные значения N^*) предполагает, что этот процесс происходит в условиях гипоксии. Таким образом, оба максимума кремния формируются в контакте с осадками и приурочены к разным ВМ.

Важно отметить, что подобные ситуации уже наблюдались примерно в той же части СЛО. Например, в сентябре-октябре 2004 года японские исследователи наблюдали максимум минерального растворенного кремния (до $\approx 35 \mu\text{M}$) в АВ (соленость 34,1-34,5) в том же районе на горизонтах 120–130 м [1]. Оцененный ими параметр N^{**} (а не N^* как в нашем случае) составил около $-5 \mu\text{M}$. Также как и во время экспедиции SWERUS-C3 на ледоколе Oden в июле-сентябре 2014 г в районе материкового склона Восточно-Сибирского моря наблюдали воды с термохалинными характеристиками, отвечающими АВ, и высокими значениями концентрации минерального растворённого кремния. Однако тогда максимальная концентрация кремния, сопровождавшаяся минимумом растворённого кислорода, составила порядка 50 мкМ [2]. И в первом и во втором случаях максимум кремния был объяснен накоплением и растворением створок диатомовых водорослей в галоклине в районе материкового склона. Однако такие процессы вряд ли могли бы привести к столь заметному снижению концентрации растворённого кислорода. В августе 2018 г. в ходе экспедиции на НИС «ТИНРО» Тихоокеанского филиала ВНИРО в северную часть Чукотского моря приблизительно в том же районе также наблюдались высокие значения концентрации минерального растворённого кремния (до 72,8–82,9 μM) в водах с соленостью 33,40-34,59 на глубинах 136–185 м [А.С. Важова, персональное сообщение].

Обобщая все приведенные цифры, можно заключить, что, по крайней мере, с 2004 года наблюдается тенденция к росту концентрации минерального кремния, падению концентрации растворенного кислорода и росту дефицита минерального азота в водах верхнего галоклина в исследуемом районе. Данная тенденция связана, вероятно, с попаданием АВ в условия контакта с донным осадком, в котором происходит относительно интенсивная минерализация органического вещества, растворение биогенного взвешенного кремния (главным образом, створок диатомей) и денитрификация в связи с дефицитом растворенного кислорода из-за расходования его на окисление органического вещества.

По нашему мнению, более вероятным объяснением наблюдаемых процессов может служить постепенное накопление в водах атлантического происхождения минерального кремния из-за длительного контакта с осадками и латеральная изопикническая адвекция вод с такими относительно необычными для АВ химическими характеристиками за пределы материкового склона.

Список литературы

- 1) Nishino S., Shimada K., Itoh M., and Chiba S. Vertical Double Silicate Maxima in the Sea-Ice Reduction Region of the Western Arctic Ocean: Implications for an Enhanced Biological Pump due to Sea-Ice Reduction // Journal of oceanography. 2009. V. 65. P. 871–883.
- 2) Anderson L.G., Björk G., Holby O. et al. Shelf-Basin interaction along the East Siberian Sea // Ocean Science. 2017. V. 13. № 2. P. 349-363.

МЕТАН В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОДЫ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В ЛЕТНИЙ И ОСЕННИЙ ПЕРИОДЫ 2022 Г.

Корнеева А.О.^{1,2}, Ульянова М.О.^{1,2}

¹Балтийский Федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: юго-восточная часть Балтийского моря, метан.

В числе парниковых газов второе место после углекислого газа занимает метан. Метан является продуктом природных процессов. Он поступает в водную среду за счет микробиологического и биохимического распада органического вещества в донных отложениях, разложения газогидратов, выходов из морских угольных и нефтегазоносных структур. Будучи одним из парниковых газов, метан участвует в формировании климатических условий всей нашей планеты [1].

В данной работе выявлены особенности пространственного распределения метана в поверхностном слое воды в юго-восточной части Балтийского моря в летний и осенний периоды.

В 2022 г. исследования проводились в 61 рейсе ПС «Академик Иоффе» в летний сезон (28 июня – 12 июля) и 54 рейсе ПС «Академик Сергей Вавилов» в осенний сезон (5 ноября – 11 ноября). Отбор проб осуществлялся с помощью батометров Нискина, установленных на гидрологическом пробоотборном комплексе типа «Розетта». Газовые компоненты в пробах морской воды определяли на хроматографе «Кристалл-Люкс-4000 м» (Россия).

В летний период значения растворенного метана в поверхностном слое моря изменялись незначительно в пределах 0–0,045 мкмоль/дм³. На двух прибрежных станциях обнаружены значения, превышающие 0,04 мкмоль/дм³, максимальное значение зафиксировано в районе г. Зеленоградска–0,045 мкмоль/дм³.

Полученные концентрации в осенний период изменялись в пределах 0,021–0,188 мкмоль/дм³. Минимальное значение концентрации метана было зафиксировано вдоль границы Литвы – в северо-восточной части российского сектора, где дно сложено рыхлыми породами и слабо выражено влияние выноса органического вещества с речным стоком. Прибрежная зона также характеризовалась невысокими значениями. Максимум метана 0,186–0,188 мкмоль/дм³ обнаружен в пределах Гданьской впадины и над Гданьско-Готландским порогом.

Содержание метана в осенний период на открытых участках моря на порядок выше, чем в летний, что, скорее всего, связано с выраженным летним термоклином и галоклином, которые препятствуют поступлению метана из придонного слоя в поверхностный. Кроме того, на концентрации метана в значительной степени влияет биогеохимическая активность бактерий. В более холодный сезон метан, поступающий из глубины, частично восполняет в экосистеме дефицит легкоусваиваемых продуктов фотосинтеза. В результате основная масса бактериопланктона сосредотачивается не в поверхностном слое, а в микроаэробных слоях водной толщи, где в этот период отмечаются интенсивные процессы метаноокисления [2]. В летний период в прибрежном районе содержание метана выше в 1,5–2 раза, чем в осенний. Этому способствует увеличение первичной продукции, обильное цветение синезелёных водорослей и, как следствие, накопление органического вещества. Также летом в прибрежных областях моря формируется более тёплый с меньшей соленостью поверхностный слой воды, из-за чего отток метана с поверхности ослабевает. Этому способствуют теплые более пресные воды, поступающие с суши летом. Максимальные значения в летний и осенний периоды различаются больше чем в 4 раза, минимальные значения отличаются незначительно.

Будучи парниковым газом, метан в юго-восточной части Балтийского моря находится в небольших количествах, даже несмотря на различающиеся концентрации в летний и осенний периоды. Отдельные повышения концентраций метана в поверхностном слое воды, вероятно, являются

следствием движения водных масс, влияния биохимических процессов и поступления метана из локальных глубинных источников.

Исследования выполнены в рамках госзадания ИО РАН (тема №FMWE-2021-0012).

Список литературы

- 1) Мишукова Г. И. Пространственная изменчивость распределения метана в морской среде и его потоков на границе вода-атмосфера в Западной части Охотского моря / Г. И. Мишукова, Р. Б. Шакиров // Водные ресурсы. Т. 44. № 4. 2017. С. 493-503.
- 2) А.Ю. Леин, М.В. Иванов. Биогеохимический цикл метана в океане, 2009. 576 с.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ И ПОТОКИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ЭСТУАРИИ Р. ПАРТИЗАНСКАЯ (ЗАЛ. НАХОДКА, ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

Крыжова К.А.¹, Семкин П.Ю.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: гидрохимия, карбонатная система, растворенный углерод, потоки углекислого газа, эстуарий.

Океан является как регулятором климата, так и цикла углерода, поглощая около четверти ежегодно выделяемого в настоящее время антропогенного углекислого газа (CO₂) [1]. Поступление различных форм углерода в воду в результате деятельности человека вызывают повышение температуры океана, закисление воды (уменьшение рН воды и степени насыщения минералами карбоната кальция) и более быстрое растворение кислорода с некоторыми свидетельствами изменений в круговороте питательных веществ и первичной продукции. Потепление океана влияет на морские организмы на многих трофических уровнях, негативно отражаясь на рыболовстве, что сказывается на производстве продуктов питания и на человеке. Общее увеличение концентрации CO₂ в атмосфере в совокупности со значительным поступлением биогенных элементов в морские экосистемы в результате антропогенной деятельности стали результатом трансформации цикла углерода в прибрежных акваториях [2].

На прибрежные биоценозы часто влияет деятельность человека, поскольку большая часть населения мира сосредоточена вокруг прибрежных районов. Этот фактор так же объясняет повышенный интерес людей к рыбному промыслу, который составляет немаловажную экономическую составляющую для портовых городов и стран. В реках и эстуариях Приморья сосредоточены ресурсы многих промысловых беспозвоночных и рыб [3]. Эстуарии являются наиболее продуктивными областями среди морских экосистем, поскольку они получают биогенные элементы со стоком рек и, таким образом, обеспечивают сложный круговорот питательных веществ. Биогеохимические процессы в прибрежной зоне могут существенно отличаться от типичных для открытых акваторий из-за интенсивного взаимодействия морской воды, донных отложений, атмосферы и берега.

В данной работе стоит задача рассмотрения изменений условий среды под влиянием естественных и антропогенных факторов. Используются данные за 2012 г., полученные в результате натурных измерений на сетке гидрологических станций, которая простиралась вглубь реки Партизанская на 10 км. Гидрохимические параметры позднее обработанных в лаборатории гидрохимии ТОИ ДВО РАН. Построены профили колебания температуры, солености и концентрации хлорофилла – «а» в различные сезоны. Особенность гидрологического режима в акватории заключалась в малом речном стоке в период исследования и распространение соленосных вод вверх по течению, преимущественно, в придонном слое. Было обнаружено аномальное цветение фотосинтезирующих водорослей в зимний период содержание хлорофилла – «а» подо льдом (52 мг/л), что может быть связано с активной зимней конвекцией, поднимающей детрит со дна и прочими условиями, благоприятными для роста и развития фитопланктона, такими, как высокая прозрачность льда, относительно высокая концентрация кислорода в воде (>9 мл/л) и наличие мелководных порогов. Основным эффектом цветения фитопланктона является формирование гипероксии/гипоксии (в зависимости от освещенности) в период максимальной толщины льда и минимального речного стока.

Помимо этого, в работе представлены параметры карбонатной системы: рН, щелочность (ТА – Total Alkalinity), парциальное давление углекислого газа (pCO₂) и растворенный неорганический углерод (DIC). Было показано, что в пробах, отобранных на станциях, расположенных в реке и в

открытой части речного взморья парциальное давление сильно отличается, и то превышает (1000-2000 мкатм), что оказывается меньше равновесного значения (взятого за 390 мкатм). В целом, в осенне-зимний период эстуарий р. Партизанская являлся источником CO_2 в атмосферу, из-за высокой скорости деструкции органического вещества, что подтверждают полученные величины выше нуля потоков углекислого газа (F_{CO_2}) - среднее значение для района 83,05 (ммоль·м⁻²·сут⁻¹), а в весенне-летний период потоки меняли направление и, соответственно, знак в разных точках пробоотбора (от -74,01– инвазия газа, до 198,41 (ммоль·м⁻²·сут⁻¹) – эвазия газа.

Таким образом, исследование карбонатной системы, объясняет процессы, связанные с продукцией и деструкцией органического вещества в эстуариях рек, позволяет лучше понять интенсивность и направленность колебаний потоков углерода в прибрежных районах, контролировать возникновение эвтрофирования даже в олиготрофных водоемах и нестабильность экосистем в целом.

Список литературы

- 1) Friedlingstein et al. Global Carbon Budget // Copernicus Publications, Earth Syst. Sci. Data. Vol. 12. 2020. P. 3269–3340.
- 2) Орехова Н.А., Медведев Е.В., Коновалов С.К. Характеристики карбонатной системы вод Севастопольской бухты в 2009 – 2015 гг. // Морской гидрофизический журнал. 2016. Т. 3. С. 40-51.
- 3) Важова А.С. Сезонные изменения концентраций биогенных веществ и содержания растворенного кислорода в реках Южного Приморья // Известия ТИНРО. 2017. Т. 191. С. 210-222.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗГРУЗКИ СУБМАРИННЫХ ГРУНТОВЫХ ВОД В ВОСТОЧНО-АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ РОССИИ

Леусов А.Э., Чаркин А.Н.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: грунтовые воды, Арктика, разгрузка грунтовых вод, арктические экосистемы.

Разгрузка субмаринных грунтовых вод (СГВ) является важным компонентом гидрологического цикла и химического баланса в прибрежной зоне [1]. До недавнего времени сам факт существования такого явления в восточно-арктических морях России был под вопросом по причине наличия повсеместно распространенных субаквальных многолетнемерзлых пород, с гидрогеологической позиции, благодаря цементирующему действию подземного льда, являющихся криогенными водоупорами. Однако с обнаружением в 2015 году в юго-западной части моря Лаптевых зоны разгрузки СГВ с оцененной скоростью поступления в $1.7 \times 10^6 \text{ м}^3$ в сутки [2] сразу возник вопрос о влиянии столь масштабного и малоизученного явления на арктические морские экосистемы. Изучение этого вопроса и является целью данного исследования.

В результате моделирования смешения водных масс определено, что содержание грунтовых вод в районе их разгрузки достигает 7 % [3]. В ходе последующих экспедиций было установлено, что данное место разгрузки грунтовых вод не является единичным для восточного склона авандельты реки Лены. Севернее уже известного района напротив Быковской протоки нами был обнаружен новый район разгрузки СГВ напротив Сардахской протоки. Субмаринная разгрузка грунтовых вод была определена с помощью естественных радионуклидов ^{224}Ra , ^{223}Ra , ^{228}Ra и ^{226}Ra , а также благодаря данным по стабильным изотопам $\delta^{18}\text{O}$. Был установлен подмерзлотный генезис вод с помощью $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ отношения и максимальной щелочности относительно остальных вод акватории Буор-Хая [3]. Также отмечено, что субмаринные грунтовые воды являются источником биогенных элементов и по-разному влияют на эвтрофикационные процессы. В одном случае, в условиях интенсивного поступления биогенов образуется дефицит растворенного кислорода в результате цветения водорослей, но локальная экосистема не угнетается, хотя и преобладают донные биоценозы не требовательные к кислороду. Во втором же случае мы обнаружили, что поступающий с СГВ в избытке аммоний не перерабатывается в нитриты и нитраты и сильно угнетает местные биоценозы.

В акватории Чаунской губы (Восточно-Сибирское море) в ходе экспедиции 2020 года было обнаружено несколько мест разгрузки с относительно высокой температурой воды, большой активностью в ней естественных радионуклидов радия и высокой концентрацией металлов [4]. Данные параметры могут указывать на гидротермальный генезис обнаруженных мест разгрузки СГВ. Сообщества Чаунской губы демонстрировали нехарактерное для прибрежных арктических экосистем видовое богатство. Обнаруженные в акватории Чаунской губы субмаринные гидротермальных источники, вероятно, являются причиной существования необычных биоценозов в этом водоеме.

Таким образом разгрузка субмаринных грунтовых вод в арктических акваториях не просто существует как явление, но и оказывает значительное влияние на местные биоценозы.

Работы выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ 19-17-00058.

Список литературы

- 1) Moore, W.S. Sources and fluxes of submarine groundwater discharge delineated by radium isotopes / W.S. Moore // Biogeochemistry. Vol. 66. 2003. P. 75–93.

- 2) Charkin, A.N. Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: A case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea. / A.N. Charkin, M.R. Loeff, N.E. Shakhova [et. al.] // The Cryosphere. Vol. 11. 2017. P. 2305-2327.
- 3) Charkin, A.N. Hydrochemistry and isotopic signatures of subpermafrost groundwater discharge along the eastern slope of the Lena River Delta in the Laptev Sea / A.N. Charkin, I.I. Pipko, G.Yu. Pavlova [et. al.] // Journal of Hydrology. – 2020. – 590.
- 4) Комплексные исследования состояния морских экосистем восточно-арктических и дальневосточных морей в 60-м рейсе НИС «Академик Опарин» / А. Н. Чаркин, П. Ю. Семкин, К. Н. Кособоков [и др.] // Итоги экспедиционных исследований в 2020 году в Мировом океане и внутренних водах: Тезисы докладов всероссийской научной конференции, Москва, 24–26 февраля 2021 года / Ответственный редактор Т.В. Дабижа. – Севастополь: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Морской гидрофизический институт РАН", 2021. – С. 96-99.

ТЕНДЕНЦИЯ ПОДКИСЛЕНИЯ ВОД АРКТИКИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 30 ЛЕТ И ОЦЕНКА ЕЁ ДИНАМИКИ НА КОНЕЦ 21-ГО СТОЛЕТИЯ

Малышева А.С.^{1,2}, Радченко Ю.В.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: рН, подкисление океана, сценарии и модели климата, СМIP6, Северный Ледовитый океан, Арктика.

Мировой океан – один из крупнейших мировых резервуаров углерода и основной поглотитель антропогенных выбросов CO₂. Процесс повышения кислотности или понижения рН морской воды является следствием растворения повышенного содержания CO₂ в атмосфере, и называется подкислением океана (ПО). Среднее значение рН поверхностных вод в Мировом океане колеблется от 7.9 до 8.3 – морская вода является слабощелочным раствором [2]. Считая с доиндустриальной эпохи (с 1750 по 1994 г.) воды Мирового океана поглотили примерно 30 % антропогенных выбросов углерода, что привело к глобальному снижению рН поверхностных вод примерно на 0.1 (от 8.25 до 8.14) [5]. В высоких широтах ПО происходит быстрее, чем в тропиках и субтропиках, поскольку в высоких широтах буферная емкость – способность раствора поддерживать постоянный рН, несколько ниже [2]. В Арктике ПО усиливается также из-за низких температур вод, увеличения запасов пресной воды (речной сток и таяние льдов) и притока тихоокеанских вод с низким рН [1].

В данном исследовании была определена динамика подкисления Северного Ледовитого океана за период 1993-2021 гг. и проведен анализ будущих тенденций ПО в свете проекций климата Арктики на 21-е столетие. Оценка тренда ПО производилась по *in situ* данным с базы данных GLODAPv2.2021 (Global Ocean Data Analysis Project, <https://www.glodap.info/>) по численным оценкам водородного показателя рН с 1993 по 2019 год на 4970 станциях в поверхностном горизонте (0-20 м). Также, были использованы оценки рН по данным реанализа Global Ocean Biogeochemistry Hindcast (GLOBAL_MULTITYEAR_BGC_001_029, <https://resources.marine.copernicus.eu/>). В данной базе пространственное разрешение – 0.25°×0.25°, временное разрешение – 1 месяц. Рассматривались данные для поверхностного слоя (0.5 м) за период с 1993 по 2021 год. Данные реанализа описывают 62% от *in situ* данных GLODAP ($r^2 = 0.62$, $p < 0.01$, $N = 56$), сравнение проводилось по станциям, совпадающим по дате, а по координатам в пределах 1 км.

Тенденция подкисления вод Арктики по *in situ* данным (GLODAP) показала, что за 26 лет (с 1993 по 2019 год) среднее значение рН снизилось на 0.9%: с 8.18 до 8.11. Общий тренд указывает на увеличение ПО. По данным реанализа среднегодовое значение рН снизилось с 8.096 до 8.048 (с 1993 по 2021 год). За рассматриваемый период тренд подкисления составил -0.7%. Скорость подкисления, как и в случае с *in situ* данными GLODAP, равнялась -0.03% в год.

Для расчета будущих тенденций ПО для Арктического региона (60-90° с.ш.) использовались модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) международного проекта СМIP6 (6-я фаза международного проекта сравнения объединенных моделей). Оценка ПО проводилась по изменчивости рН. В проекте СМIP6 данный параметр рассчитывается в 12 моделях. Для выполнения задачи были взяты среднемесячные значения рН с портала платформы Earth System Grid Federation (<https://esgf.llnl.gov/>). В качестве данных наблюдений рН были использованы данные реанализа. Для расчета проекций будущего ПО Арктики по данным глобальных климатических моделей СМIP6 использовались 4 сценария возможного будущего SSP (Shared Socioeconomic Pathways), в которых представлены разные уровни социально-экономического развития, эмиссии парниковых газов в атмосферу, развития землепользования и радиационного воздействия: SSP1-

2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5. Оценка исторических сценариев (сравнение с данными наблюдения за 1993-2014 г.) проводилась с помощью метода перцентилей [3] для всего Арктического региона. После были отобраны лучшие модели – топ-25 моделей от общего числа моделей. В подансамбль моделей вошли следующие 4 модели: MPI-ESM1-2-LR, NorESM2-MM, NorESM2-LM, CMCC-ESM2. По прогнозу моделей CMIP6 рН к концу 21-го столетия по сценарию SSP1-2.6 составил 7.98, тенденция ПО по сравнению со средним значением *in situ* рН по базе GLODAP за 2019 год: -1.4%. По сценарию SSP2-4.5 значение рН к 2100 году – 7.86 (тренд -2.9%), по SSP3-7.0 – 7.71 (-4.9%), по SSP5-8.5 – 7.59 (-6.2%). При использовании в ансамбле всех доступных моделей по каждому из сценариев увеличивается размах неопределенности, а при состыковке временных рядов в 2015 году наблюдается явное несовпадение средних значений модельных рН, что указывает на правильность метода выбора лучших моделей.

Проекция изменения ПО Арктики к концу 21 века, полученные с применением тщательно отобранных моделей CMIP6, свидетельствуют о продолжающейся тенденции подкисления Арктики. Наиболее высокие скорости подкисления (-4.9 % и -6.2%) предсказываются моделями SSP3-7.0 и SSP5-8.5, согласно которым средняя температура воздуха в 2100 г. повысится, соответственно, на 3.6 °C и 4.4°C [4]. Сравнение полученных результатов с ранее сделанными оценками [4] показывает, что ПО в условиях Арктики будет значительнее, чем в среднем по Мировому океану: разница по каждому из сценариев SSP составляет -0.1.

Публикация выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГУ № 94033410.

Список литературы

- 1) AMAP Assessment 2018: Arctic Ocean Acidification. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway. 2018.
- 2) Bindoff N.L., Willebrand J., Artale V., Cazenave A., Gregory J.M., Gulev S., Hanawa K., Le Quere C., Levitus S., Nojiri Y., Shum C.K., Talley L.D., Unnikrishnan A.S., Josey S.A., Taxis M., Tsimplis M., Woodworth P. Observations: oceanic climate change and sea level, in Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I, edited by: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L., Cambridge University Press, Cambridge. 2007. P. 385–428.
- 3) Gnatiuk N., Radchenko I., Davy R., Morozov E., Bobylev L. Simulation of factors affecting *Emiliania huxleyi* blooms in Arctic and sub-Arctic seas by CMIP5 climate models: model validation and selection // Biogeosciences. V. 17(4). 2020. P. 1199–1212.
- 4) IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.
- 5) Royal Society: Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide, The Royal society, London. 2005. 223 pp.

ПОТОКИ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В ЧЕРНОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ 2018–2019 ГГ.

Мукосеев И.Н., Гурова Ю.С., Орехова Н.А.

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: взвешенное вещество, органический углерод, неорганический углерод, Черное море.

Данная работа посвящена изучению потоков взвешенного вещества в Черном море. Основной целью является оценка потоков взвешенного вещества, а также органического и неорганического углерода взвешенного вещества в глубоководной части Черного моря.

Для изучения потоков взвешенного вещества в водной толще использовались данные, полученные в результате постановки седиментационных ловушек в глубоководной части Черного моря (глубина станции 1750 м) на разрезе мыс Херсонес - пролив Босфор. Ловушки были установлены в ноябре 2018 г. на различных глубинах, и включали как интегральный сбор материала в течение года (глубины 150 м, 450 м, 950 м, 1450 м, 1700 м), так и непрерывный во времени (в течение года) с заданной экспозицией (1 месяц) на глубинах 150 м и 1700 м. Таким образом, основной материал для работы был получен в период, включающий в себя разные сезоны с ноября 2018 года по октябрь 2019 года, на разных глубинах и с заданной дискретностью сбора взвешенного вещества.

Обработка собранного взвешенного вещества проводилась по единой для всех проб методике. Каждую пробу фильтровали под вакуумом через параллельные предварительно взвешенные ядерные фильтры диаметром 47 мм и размером пор 0,45 мкм для определения величины потоков и дальнейших исследований состава вещества.

Одновременно вели фильтрацию для тех же горизонтов через прокаленные при температуре 450°C стекловолкнистые фильтры для определения содержания общего, органического ($C_{орг}$) и карбонатного ($C_{карб}$) углерода.

После взвешивания ядерных фильтров с отфильтрованным веществом определяли суммарное количество материала в каждой пробе для расчета вертикального потока осадочного вещества в $мг/м^2/сутки$ (пробы из ловушек) и концентрации водной взвеси в $мг/л$ (фильтрационная взвесь).

Определение взвешенного органического и карбонатного углерода проводили методом кулонометрического титрования на анализаторе углерода АН-7529, аналитик И.А. Забегаев (МГИ РАН).

Вертикальные потоки осадочного вещества характеризовались значительной пространственно-временной изменчивостью. Их численные величины варьировали от 4 до 60 $мг/(м^2 \cdot сут)$ при среднем значении 28 $мг/(м^2 \cdot сут)$.

При этом отмечена неоднородность их распределения с глубиной - снижение потоков от 43 $мг/(м^2 \cdot сут)$ до 16 $мг/(м^2 \cdot сут)$ наблюдается с увеличением глубины от 150 м до 950 м соответственно), а увеличение потоков от 16 $мг/(м^2 \cdot сут)$ до 26,7 $мг/(м^2 \cdot сут)$ наблюдается с увеличением глубины от 950 м до 1700 м соответственно.

В сезонной изменчивости также отмечена неоднородность их изменения. Наибольшие потоки фиксировались в декабре, июле-сентябре, причем в подповерхностном горизонте (150 м) максимум приходится на декабрь, а в придонном (1700 м) - на сентябрь. Минимум в придонном слое достигался в январе, июне и октябре (25,96; 23,31 и 30,47 $мг/(м^2 \cdot сут)$ соответственно). В подповерхностном слое минимальный поток взвешенного вещества наблюдался в феврале и июне (4,35 и 4,06 $мг/(м^2 \cdot сут)$ соответственно).

В ходе анализа углеродной составляющей потока взвешенного вещества были получены следующие данные.

Доля органического углерода в составе потока относительно невелика и в среднем составляет 13 и 19% для подповерхностного и придонного слоев соответственно, с максимумами в августе в подповерхностном слое (21%) и в июле и сентябре в придонном слое (24%), и минимумами в сентябре в подповерхностном слое (7%) и в марте-апреле в придонном слое (13%).

Доля неорганического углерода в составе потока еще ниже и в среднем составляет 2 и 4% для подповерхностного и придонного слоев соответственно, с максимумами в июле в придонном слое (9%) и октябре в подповерхностном слое (6%), минимумом - в декабре (1%) в обоих слоях.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Оценка зависимости потоков CO₂ на поверхности Черного моря от физико-химических характеристик морской среды и получение характеристик сезонных изменений потоков» № FNNN-2022-0003).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В 2022 ГОДУ

Муратова А.А.^{1,2}, Бубнова Е.С.^{1,2}, Полухин А.А.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

Ключевые слова: общая щелочность, рН, Гданьский бассейн.

Карбонатная система морских вод играет важную роль в химии океана и является основной буферной системой вод. Этот буфер регулирует водородный показатель и, таким образом, препятствует закислению вод, влияя на многие биохимические и геохимические процессы. Изменение концентраций, а также распределение общей щелочности в Балтийском море зависит как от заточков североморских вод и речного стока, так и от внутреннего перемешивания между бассейнами моря. Реки, впадающие в юго-восточную часть Балтийского моря, повышают общую щелочность акватории, так как протекают через богатые известняком водосборные бассейны [1].

В данной работе рассматриваются результаты двух экспедиций: 54 рейса ПС «Академик Сергей Вавилов» (04 – 10.11.2022) и 91 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» (10 – 28.12.2022), одна из задач которых заключалась в выявлении осенне-зимних особенностей гидролого-гидрохимических процессов в Балтийском море. Далее для удобства экспедиции названы «Осенняя» и «Зимняя» соответственно. Пробы воды для определения рН и общей титруемой щелочности отбирали гидрологическим комплексом Hydrobios MWS 12 Slimline, оснащенным батометрами Нискина. Соленость измерялась многоканальными гидрофизическими зондами Sea&Sun Tech CTD 90 и Idronaut Ocean 316. Отбор и анализ проб производился по стандартным методикам, принятым в отечественной практике [2].

По результатам осенней экспедиции было установлено, что вариативность значений общей щелочности в поверхностных водах невысока. Распределение солености на поверхности практически однородное по всем станциям — от 7,08 до 7,34; колебание значений щелочности в диапазоне от 1630 мкмоль/л до 1740 мкмоль/л изменяется с соленостью. Аналогичная зависимость была зафиксирована на вертикальных профилях для всех выполненных станций: соленость повышается с глубиной, концентрации щелочности пропорционально увеличиваются с глубиной, что соответствует классическому распределению титруемой щелочности [3, 4].

Водородный показатель в поверхностном слое не демонстрирует сильных пространственных различий благодаря интенсивному осеннему перемешиванию, среднее значение рН = 8,00. Концентрация водородных ионов вод глубинного слоя из-за его изолированности и накопления в нем CO₂ от разложения органического вещества достигает значений рН = 7,04.

Результаты зимней экспедиции подтвердили прямую зависимость титруемой щелочности от солености в отсутствии сероводорода. И наоборот, при наличии в придонном слое растворенного сероводорода, на верхней границе этого слоя происходит скачок значений на вертикальном профиле общей щелочности. Максимальные значения сероводорода (1,2 мг/л) совпадают с максимальными значениями щелочности (1860 мкмоль/л). Значения общей щелочности и солености на поверхности изменялись незначительно: от 1620 мкмоль/л до 1720 мкмоль/л и от 7,09 до 7,57 соответственно, что повторяет результаты осенней экспедиции.

Распределение водородного показателя характеризуется уменьшением значений рН с глубиной от 8,11 до 7,15. Отклонения от данной тенденции наблюдаются в центральной части Гданьской впадины: значения водородного показателя равномерно уменьшаются (от 7,96 до 7,11) до глубины 80 м, после чего равномерно увеличиваются ко дну (до 7,27). Также как и в осенней экспедиции, во время зимнего рейса пространственное распределение рН в поверхностном слое изменяется незначительно (от 8,10 до 7,89). Таким образом, при сравнении результатов осенней и зимней

экспедиций, можно наблюдать незначительные изменения концентраций титруемой щелочности и водородного показателя рН.

Работа выполнена в рамках ГЗ FMWE-2021-0012.

Список литературы

- 1) Hjalmarsson S. Wesslander K., Anderson L.G., Omstedt A., Perttilä M., Mintrop L. Distribution, long-term development and mass balance calculation of total alkalinity in the Baltic Sea // Continental Shelf Research. No. 28 (4-5). 2008. P. 593-601.
- 2) Бордовский О.К., Чернякова А.М. Современные методы гидрохимических исследований океана // М.: ИО РАН, 1992. – 200 с.
- 3) Кондратьев С.И., Медведев Е.В., Коновалов С.К. Величины общей щелочности и рН в водах Черного моря в 2010-2011 годах // Морской гидрофизический журнал. №. 4 (196). 2017. С. 36-47.
- 4) Wolf-Gladrow D.A., Zeebe R.E., Klaas C., Körtzinger A., Dickson A.G. Total alkalinity: The explicit conservative expression and its application to biogeochemical processes // Marine Chemistry. No. 106(1-2). 2007. P. 287-300.

СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЦЕНТРАЦИЙ РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО И НЕОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА КАК МАРКЕРОВ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Мурзакова Ю.В.^{1,2}, Беляев Н.А.², Костылева А.В.², Федулов В.Ю.², Полухин А.А.²

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Карское море, растворенный органический углерод, растворенный неорганический углерод, поверхностный слой, речной сток.

Благодаря исследованиям, проведенным в отечественных и зарубежных экспедициях, известно, что квазиконсервативное поведение растворенного органического углерода (РОУ) и растворенного неорганического углерода (РНУ) является типичным для арктического бассейна [1]. Основное изменение концентраций данных параметров наблюдается в устьевых зонах и происходит в процессе смешения пресных и морских вод.

Однако исследование данных зависимостей по отдельности не позволяет достоверно объяснить ряд наблюдающихся отклонений. Например, увеличение концентрации РОУ в зонах деструкции органического вещества или уменьшение РНУ при таянии однолетнего морского льда [2]. Совместный анализ РОУ и РНУ был использован для проверки следующей гипотезы: отражается ли отклонение РОУ в большую и меньшую сторону от средней линии тренда на содержании РНУ.

Основная цель работы – выявить возможности совместного анализа зависимостей РОУ и РНУ от солености в качестве индикатора гидрохимических и биологических процессов.

Для выполнения поставленной задачи была сформирована интегральная база значений РОУ и РНУ в поверхностном слое Карского моря на основе измерений, проведенных в рейсах АМК54, АМК59, ПШ128, АМК66, АМК76, АМК81, АМК83 (2007 – 2021 гг.). В базу включены данные со 139 станций, 82 из которых относятся к осеннему периоду (с начала августа по конец сентября), а 57 – к весенне-летнему (с середины июня по начало августа). Растворенный органический углерод определялся методом высокотемпературного каталитического окисления до углекислого газа с предварительным подкислением пробы для удаления неорганического углерода [4]. Метод определения общего неорганического углерода в морской воде основан на его расчете исходя из измеренных величин рН и общей щелочности [3].

Измеренные в весенне-летний период значения РОУ варьируются от 0.64 мг/л в мористой зоне Карского моря (ст. 7015, АМК83) до 13.87 мг/л в Обской губе (ст. 5356, АМК66). Среднее значение – 5.77 мг/л (число определений $n = 57$, среднеквадратичное отклонение $\sigma = 4.51$). В осенний период максимальное значение 11.94 мг/л зафиксировано на станции 4993 (АМК54) в Обской губе, минимальное – 1.05 мг/л на станции 5045 (АМК59) в желобе Святой Анны. Среднее значение составляет 3.67 мг/л ($n = 82$, $\sigma = 2.4$).

Рассчитанные значения РНУ в весенне-летний период изменялись от 6.37 μM (ст. 5342, АМК66) в Енисейском заливе до 25.81 μM (ст. 7016, АМК83) в восточной части Карского моря. Среднее значение составляет 20.07 μM (число определений $n = 57$, среднеквадратичное отклонение $\sigma = 5.59$). В осенний период минимальное значение 3.71 μM (ст. 12818, ПШ128) было зафиксировано в Обской губе, максимальное – 26.28 μM (ст. 4954, АМК54) у побережья п-ова Ямал в восточной части моря. Среднее значение – 21.57 μM ($n = 82$, $\sigma = 5.08$).

На основании анализа сформированной базы данных, были исследованы зависимости РОУ и РНУ относительно солености. Были определены линейные зависимости и отклонения от среднего тренда.

Отклонения от линии тренда могут быть вызваны следующими причинами:

1) Отклонение от консервативного тренда в сторону снижения содержания РОУ может быть вызвано интрузией водных масс иного происхождения, в частности наличием водных масс, сформированных в результате таяния льда, а также с деградацией аллохтонного органического вещества.

2) Отклонение РОУ от консервативности в большую сторону может быть связано с поставками в экосистему Карского моря новообразованного в результате фотосинтетических процессов автохтонного органического вещества, либо связано с биотическим фактором (лизис клеток фитопланктона, увеличение первичной продукции). Так же может быть связано с интрузией вод другого происхождения. Некоторые работы показали увеличение концентраций РОУ вследствие образования морского льда.

3) Отклонение РНУ от среднего тренда в меньшую сторону может быть связано с наличием водных масс, сформированных в результате таяния льда, или в результате потребления CO₂ фитопланктоном.

4) Отклонение от консервативности в сторону увеличения содержания РНУ может быть связано с деструкцией РОУ.

На основании результатов анализа обобщенных данных можно сделать выводы, что:

- Зоны формирования максимумов автохтонной продукции выделяются по содержанию РОУ, но не находят своего отражения в концентрациях РНУ.

- Отклонение РОУ от консервативности в меньшую сторону в 2021 году отразило таяние льда на севере Карского моря.

- В осенний период в Енисейском заливе было одновременно зафиксировано пониженное содержание РОУ и повышенное – РНУ, что может отражать процесс деструкции ОБ и его окисление.

- В июле 2016 года в Енисейском заливе РОУ отклоняется от консервативности в большую сторону, а РНУ – в меньшую, что может объясняться фотосинтетической активностью и потреблением CO₂.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОРАН (FMWE-2021-0007).

Список литературы

- 1) Беляев Н. А., Поняев М. С., Кирютин А. М. Органический углерод воды, взвеси и верхнего слоя донных осадков центральной части Карского моря // Океанология. Т. 55. №. 4. 2015. С. 563-563.
- 2) Недашковский А.П. Исследование химического состава арктического морского льда // Океанография и морской лед. М.: Paulsen, 2011. С. 406-421.
- 3) Millero F. J. Thermodynamics of the carbon dioxide system in oceans // Geochim. et Cosmochim. Acta. V.59. № 4. 1995. P. 661-677.
- 4) Sugimura Y. A high temperature catalytic oxidation method for non-volatile dissolved organic carbon in seawater by direct injection of a liquid sample / Y. Sugimura, Y. Suzuki // Marine Chemistry. Vol. 24.1988. P. 105–131.

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОХИМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОД В УСТЬЕВЫХ ОБЛАСТЯХ МАЛЫХ РЕК БЕЛОГО МОРЯ

Нецветаева О.П.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: малые реки, гидрохимия, Белое море, маргинальный фильтр, устьевая область.

В устьевых областях рек, впадающих в море, возникают уникальные условия - функционирует маргинальный фильтр. Речные и морские воды подвергаются глубочайшим преобразованиям. В устьях рек приливных морей характер протекания всех процессов существенно усложняется вследствие действия приливов. Причем для Белого моря характерно наличие всех типов приливных условий, которые определяются по величине сизигийного прилива (H) согласно В.Н. Михайлову [1]. Еще сложнее природные процессы протекают в устьевых областях малых приливных рек, что вызвано рядом дополнительных причин [2], кроме уже озвученных.

Исследования устьевых областей малых рек Белого моря были начаты Северо-Западным отделением Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (СЗО ИО РАН) в 2014 г. [3].

Цель настоящей работы заключается в исследовании пространственной изменчивости концентраций фосфора и азота в устьевых областях малых рек Белого моря с различными приливными условиями.

В основе исследования лежат данные из архива СЗО ИО РАН о концентрациях биогенных элементов в устьевых водах, пробы которых отбирались с поверхности на полной воде. Концентрации фосфатов, нитратов, общего фосфора и общего азота определены фотометрически по стандартным методикам. Однако сочетание этих параметров было различным для разных рек в силу объективных причин.

В летнюю межень 2015 г. исследована мезоприливная устьевая область р. Кянда. При продвижении от морской границы вверх по водотоку отмечается рост концентрации общего фосфора синхронно с уменьшением солёности ($r = -0,93$). Между тем содержание общего азота меняется вдоль русла нелинейно. Так, сначала на устьевом взморье (0-3 км) наблюдается его увеличение, а затем на устьевом участке реки (3-10 км) наоборот снижение.

В летние меженные периоды 2019 и 2020 гг. исследовались макроприливные устьевые области р. Пыя и р. Поча соответственно. На обследованных 6 км от морской границы русла р. Пыя не зафиксировано солёных вод, что связано с аномально высоким дождевым паводком, имевшем место в период проведения работ, однако по уровню минерализации можно предположить, что морские воды из эстуария р. Мезени проникают в устье р. Пыя на 4-5 км [4]. В этих водах при продвижении от морской границы вверх по водотоку наблюдается единообразная изменчивость концентраций общего фосфора и общего азота ($r = 1,00$): снижение до створа 3 км, а затем рост. Однако в собственно речных водах ситуация меняется, содержание азота продолжает расти, а фосфора снижается в 1,5 раза.

На полной воде морские воды проникают в устье р. Поча до 7 км от морской границы. Содержание общего фосфора при увеличении солёности растёт ($r = 0,60$), а общего азота наоборот уменьшается ($r = -0,64$). Однако в эстуарии р. Кулоя, куда впадает рассматриваемая река, наблюдается обратная ситуация. Столь кардинальные различия могут быть связаны с влиянием обширных маршевых лугов, которые формируются в устье р. Почы на границе с эстуарием р. Кулоя [5].

В зимнюю межень 2021 г. исследована микроприливная устьевая область р. Солзы. На полной воде в дельте реки отмечено распространение солёных вод, в которых по сравнению с придельтовым пресным участком отмечаются более высокие концентрации как фосфора фосфатного, так и

азота нитратного. Обогащение вод солями фосфора и азота здесь может быть вызвано причинами, как естественными (поступление в воду из донных отложений в виду мелководности устьевого взморья), так и антропогенными (стоки с территории дер. Солзы и Солзенского производственно-экспериментального лососевого завода) [6].

Таким образом проведенные исследования показывают, что пространственная изменчивость рассмотренных показателей в устьевых областях малых рек Белого моря с различными приливными условиями существенно отличаются друг от друга, что обуславливается различиями в локальных природных условиях. Обнаружены связи концентраций азота и фосфора с соленостью, однако они также различны. Стоит учесть, что разовых исследований для формулирования глобальных выводов о гидрохимических режимах столь изменчивых объектов, как приливные устья малых рек, недостаточно. Для этого необходимы дополнительные более детальные и регулярные исследования.

Автор выражает благодарность всем сотрудникам СЗО ИО РАН, принимавшим участие в экспедиционных работах, а также н.с. лаборатории геохимических исследований Чульцовой А.Л. за выполнение гидрохимических анализов.

Исследования проведены в ходе выполнения государственного задания по теме № FMWE-2021-0006.

Список литературы

- 1) Михайлов В.Н. Принципы типизации и районирования устьевых областей рек (аналитический обзор) // Водные ресурсы. Т. 31. № 1. 2004. С. 5–14.
- 2) Мискевич И.В., Коробов В.Б., Алабян А.М. Специфика инженерно-экологических изысканий в приливных устьях малых рек западного сектора российской Арктики // Инженерные изыскания. Т. 12. № 3–4. 2018. С. 50–61.
- 3) Коробов В.Б. Исследования устьевых областей малых рек Белого моря ИО РАН в XXI веке // Геология морей и океанов: Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. II. М.: ИО РАН, 2022. С. 219–223.
- 4) Мискевич И.В., Лещев А.В., Яковлев А.Е., Белоруков С.К. Гидролого-гидрохимическая характеристика устья реки Пыя в Мезенском заливе Белого моря в летний период // Труды Архангельского центра Русского географического общества. Сборник научных статей. Вып. 7. Архангельск: Архангельский центр РГО, 2019. С. 286–292.
- 5) Мискевич И.В., Лещев А.В., Мосеев Д.С., Яковлев А.Е., Белоруков С.К. Характеристика природных условий устья реки Кулой в Мезенском заливе Белого моря в меженные периоды // Труды Архангельского центра Русского географического общества. Сборник научных статей. Вып. 8. Архангельск: Архангельский центр РГО, 2020. С. 154–158.
- 6) Мискевич И.В., Лохов А.С., Чульцова А.Л. Специфика формирования маргинальных фильтров в приливных устьях малых рек в зимний период на примере реки Солза в Двинском заливе Белого моря // Успехи современного естествознания. № 7. 2021. С. 54–59.

АНАЛИЗ БАЛАНСА КИСЛОРОДА В ВОДНОЙ ТОЛЩЕ ЧЁРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Новиков М.О.¹, Березина А.В.², Пахомова С.В.^{1,2}, Якушев Е.В.^{1,2}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Norwegian Institute for Water Research (NIVA), Oslo, Norway

Ключевые слова: Чёрное море, биогеохимия, математическое моделирование, окислительно-восстановительные условия, баланс кислорода.

Представления о распределении содержания кислорода в водной толще Чёрного моря имеют долгую историю. В начале исследований предполагалось, что существует слой сосуществования кислорода и сероводорода, однако, после применения усовершенствованных методик измерений было показано, что в море могут быть выделены три слоя: кислородный, субоксильный (содержащий субокисленный и субвосстановленный слои, где содержание кислорода и сероводорода ниже пределов обнаружения) и расположенный ниже сероводородный слой, где кислород отсутствует. Границы перечисленных слоёв чётко привязаны к полю плотности, однако в различных районах моря располагаются на разных глубинах, повышаясь в центрах черноморских круговоротов и заглубляясь у берегов. На глубину проникновения кислорода кроме гидродинамики оказывают влияние и биогеохимические процессы. Данная работа посвящена оценке одного из таких процессов – образования взвешенного оксида марганца Mn(IV) – с использованием математического моделирования как метода исследования.

Для расчёта эволюции биогеохимического состояния водного столба в работе мы использовали объединённую ранее модель BROM-2DBP [1] со специализированной библиотекой FABM [2]. Бентосно-пелагическая биогеохимическая модель BROM сочетает в себе относительно простую модель экосистемы с подробной биогеохимической моделью для водного столба, придонного пограничного слоя и верхнего слоя осадка с акцентом на изменения кислородного режима и окислительно-восстановительных условий. BROM рассматривает взаимосвязанные преобразования химических элементов (N, P, Si, C, O, S, Mn, Fe) и органического вещества (ОВ) в единицах азота в соответствии с соотношением Редфилда между основными биогенными веществами. Динамика ОВ включает параметризацию продукции (посредством фотосинтеза и хемосинтеза) и распада через кислородную минерализацию, денитрификацию, восстановление металлов, восстановление сульфатов и метаногенез.

С целью более точного воспроизведения моделью тонкой структуры окислительно-восстановительного слоя была введена параметризация изменения вертикальной скорости взвешенного вещества за счёт агрегации с оксидом Mn(IV):

$$W_{Ci} = W_{Ci0} + W_{Me} * Mn(IV) / (Mn(IV) + Mnt) ,$$

где W_{Ci} – суммарная вертикальная скорость, W_{Ci0} – собственная вертикальная скорость взвешенного вещества, W_{Me} – добавочная вертикальная скорость, Mn(IV) – концентрация оксида Mn(IV). Зависимость добавочной вертикальной скорости (второй член правой части уравнения) от содержания Mn(IV) была описана с помощью функции насыщения, где $Mnt = 0.1$ мкМ (эмпирический коэффициент). Переменные, к которым применяется параметризация: элементная сера, взвешенные соли марганца и железа, CaCO₃, взвешенное ОВ (лабильное и стабильное), фитопланктон, гетеротрофы и бактерии. Гидрофизическим форсингом являлись ежечасные данные для 2010 года о температуре, солёности и ортогональных составляющих течений для точки с координатами 43.5 °с.ш. 37.75 °в.д с портала “Copernicus”. Данные являются результатом расчёта реанализа на основе гидродинамической численной модели NEMO [3].

Для учёта стационарных восстановительных условий в расчётах учитывались верхние 350 м. Полученные данные сравнивались с данными натурных наблюдений экспедиции на НИС “Кпорт”

в центре Западного круговорота Черного моря в марте 2003 года [4]. Полученные вертикальные распределения гидрохимических параметров согласуются с существующей гидрохимической структурой Черного моря. Растворённый кислород имеет аналогичное распределение в модели и наблюдениях, занимая верхний до уровня условной плотности $\sigma_t \approx 15.5$. В пределах окислительно-восстановительного слоя были воспроизведены максимумы нитратов, Mn(IV), Mn(III), Fe(III), элементарной серы и минимум фосфата. Ниже окислительно-восстановительного слоя модель воспроизводила максимумы Mn(II) и Fe(II).

С целью оценки введённой параметризации изменения вертикальной скорости взвешенного вещества было проведено сравнение результатов моделирования без добавочной скорости и с добавочной скоростью. Сравнение показало, что введение параметризации приближает результаты моделирования к данным натуральных наблюдений по ряду параметров, таких как pH, фосфаты и элементарная сера. Введение дополнительной вертикальной скорости однозначно сказалось на солях железа и марганца, снизив их пики вертикальных распределений глубже на 0.1 – 0.3 единицы условной плотности (около 2 м). На различных видах планктона и ОВ введённые изменения сказались незначительно. Также изменению подверглись границы редокс-слоя, снизившись на 0.2 единицы условной плотности. Так, максимальная глубина проникновения кислорода достигла 15.6 единиц в марте, а минимальная – 15.4 в августе.

Таким образом, с помощью модели было показано, что учет дополнительной вертикальной скорости взвешенного вещества, связанной с осаждением Mn(IV), приводит к увеличению толщины кислородного слоя приблизительно на 3 м. Данные изменения положительно сказались на поведении модели в плане воспроизведения данных натуральных наблюдений. В дальнейшем, при переходе с одномерного случая на трёхмерный, возможен учёт кислородосодержания во всём Черном море при различных климатических сценариях.

Список литературы

- 1) Yakushev E.V., Protsenko E.A., Bruggeman J., Wallhead P., Pakhomova S.V., Yakubov S.Kh., Bellerby R.G.J., and Couture R.-M.: Bottom RedOx Model (BROM v.1.1): a coupled benthic–pelagic model for simulation of water and sediment biogeochemistry // *Geosci. Model Dev.*, Vol. 10. 2017. P. 453–482, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-453-2017>.
- 2) Bruggeman J., Bolding K.A. general framework for aquatic biogeochemical models // *Environmental Modelling & Software*. Vol. 61. 2014. P. 249–265. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.04.002.
- 3) Lima L., Aydogdu A., Escudier R., Masina S., Ciliberti S.A., Azevedo D., Peneva E.L., Causio S., Cipollone A., Clementi E., Cretí S., Stefanizzi L., Lecci R., Palermo F., Coppini G., Pinaridi N., Palazov A. (2020). Black Sea Physical Reanalysis (CMEMS BS-Currents) (Version 1) set. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). https://doi.org/10.25423/CMC/C/BLKSEA_MULTIYEAR_PHY_007_004.
- 4) Pakhomova S.V., Rozanov A.G., Yakushev E.V. Dissolved and Particulate Forms of Iron and Manganese in the Redox Zone of the Black Sea // *Oceanology*. Vol. 49. No. 6. 2009. P. 773–787.

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В
ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОД ЗОНЫ СМЕШЕНИЯ РЕЧНЫХ И МОРСКИХ
ВОД БАССЕЙНА РЕКИ АМАЗОНКИ В ХОДЕ 52 РЕЙСА
НИС «АКАДЕМИК БОРИС ПЕТРОВ»**

Селиверстова А.М., Зуев О.А., Чульцова А.Л.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: река Амазонка, гидрохимия, биогенные элементы.

Амазонка – крупнейшая река в мире по протяженности, стоку и бассейну водосбора. Амазонская речная система расположена в экваториальной части Южной Америки, берет свое начало от слияния горных рек Мараньон и Укаяли, протекает – в основном – по Амазонской низменности и впадает в Атлантический океан. Последние масштабные исследования реки проводились Институтом океанологии лишь в 1983 г (9 рейс НИС «Профессор Штокман») и важнейшими задачами 52 рейса НИС «Академик Борис Петров» были не только изучение особенностей структуры термохалинных, биогеохимических и гидрофизических полей в зоне взаимодействия прибрежной океанской циркуляции и материкового пресноводного стока и актуализация имеющихся данных, но и развитие международного сотрудничества с Бразилией – страной-партнером БРИКС. Целью данной работы является характеристика абиотической составляющей в зоне смешения речных и морских вод бассейна реки Амазонки.

Гидрохимические работы в рейсе «АБП 52» в зоне смешения речных и морских вод на шельфе реки Амазонки велись с 06.11.2022 по 08.12.2022. Было выполнено 27 станций, расположенных перпендикулярно береговой линии, разрезами от 2 до 5 станций. Все пробы предварительно фильтровались через ядерные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм. Велось определение таких параметров как растворенный кислород (O_2), водородный показатель (рН), общая титруемая щелочность (Alk), растворенный кремний (SiO_2), фосфатный (или минеральный) фосфор ($P-PO_4$), минеральные формы азота нитратов ($N-NO_3$) и нитритов ($N-NO_2$) по методикам, принятым в отечественной гидрохимии [1, 2, 3].

Распределение общей титруемой щелочности и растворенного кремния хорошо соотносится с распределением температуры и солености. Эти параметры являются маркерами речного стока, что и нашло отражение на данном полигоне. Наименьшие величины общей щелочности (2038-2200 μM) и наибольшие растворенного кремния (8.95-12.32 μM) наблюдаются на береговых станциях. По мере удаления от берега и от языка выноса речной воды, величины общей щелочности увеличиваются, а силикатов уменьшаются до 2433 μM и 0.45-0.55 μM , соответственно. Величины рН варьировались от 8.18 (на береговых станциях) до 8.23 (в мористой части). Поскольку воды реки Амазонки характеризуются низкими значениями рН 4-5 единиц шкалы [4], то распределение этого параметра в данном случае, также, как и распределение общей щелочности и растворенного кремния, отражает влияние стока реки.

Содержание растворенного кислорода на полигоне колебалось от 4.35 до 4.95 мл/л (94-111% насыщения). Максимумы отмечены на станциях северо-западной части полигона, где наиболее ярко прослеживается влияние Амазонки (4.94-4.95 мл/л при 110-111% насыщения), минимумы – на станциях юго-восточной части, где наблюдается влияние рек, относящихся также к ее бассейну (4.35 мл/л при 94-98% насыщения). Столь низкие концентрации растворенного кислорода характерны для данного региона [5], однако высокий процент насыщения вод кислородом указывает на активные процессы фотосинтеза.

Содержание фосфатного фосфора, ионов азота нитратов и нитритов на полигоне было крайне низко – в среднем 0.10, 0.14 и 0 μM , соответственно. Локальные максимумы их содержания тя-

готовят к береговым станциям, с продвижением к мористой части показатели падают до нулевых значений, что связано с уменьшением влияния стока реки Амазонки.

Следует отметить, что на двух соседних станциях северо-западной части полигона в одном случае наблюдались максимум содержания растворенного кислорода и локальные минимумы нитратов и нитритов (в следствии процессов фотосинтеза) и максимумы фосфатов, нитратов и нитритов при минимуме содержания растворенного кислорода (в следствии процессов окисления органического веществ) во втором.

Воды Амазонки относят к наиболее химически бедным водам Земли [4]. Столь низкие величины биогенных элементов на представленном полигоне можно объяснить либо изначально низким их содержанием в водах реки, либо активным биологическим потреблением. Неравномерные «пятна» максимумов и минимумов содержания биогенных элементов, а также высокий процент насыщения кислородом вод позволяют предположить именно второй вариант.

Работа выполнена при поддержке госзадания FMWE-2021-0016 «Взаимодействие биосфер в Мировом океане».

Список литературы

- 1) Современные методы гидрохимических исследований океана. М. АН СССР. Институт океанологии им. П.П. Ширшова. Под. ред. Бордовского О.К и Черняковой А.М. 1992. 200 с.
- 2) РД 52. 10. 243 – 92. Руководство по химическому анализу морских вод. СПб. 1993. 264 с.
- 3) Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана. Под. ред. Сапожникова. М.: Изд-во: ВНИРО. 2003. 203 с.
- 4) Монин А.С., Гордеев В.В. Амазония. М.: Наука. 1988. 217 с
- 5) Ляхин Ю.И. Гидрохимия тропических районов Мирового океана. Ленинград: Гидрометеоздат. 1990. 212 с.

ОТКЛИК O_2 И pCO_2 НА ЦВЕТЕНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА В ЭВТРОФНОМ ЭСТУАРИИ РЕКИ РАЗДОЛЬНОЙ (АМУРСКИЙ ЗАЛИВ, ЯПОНСКОЕ МОРЕ) В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА

Семкин П.Ю., Барабанщиков Ю.А.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: эстуарий, цветение фитопланктона, кислород, углекислый газ, период ледостава.

Цветение фитопланктона в эстуариях представляет собой динамичное явление и имеет большое значение для функционирования водных экосистем, поскольку за относительно короткие промежутки времени происходит существенный прирост биомассы фитопланктона. Роль гидрологических условий в стимулировании цветения фитопланктона для эвтрофированных эстуариев окончательно не выяснена.

Мы отследили вспышку цветения фитопланктона в ходе серии съемок в эстуарии эвтрофированной реки Раздольной в период наибольшего развития ледяного покрова – с середины января по февраль 2022 г. Цветение распространялось в придонном слое воды под халоклином на расстояние 21 км от устьевого бара реки. Концентрация хлорофилла "а" в районе цветения увеличивалась от 15 до 100 мкг/л за 20 дней, с сопутствующим возрастанием концентрации O_2 со скоростью около 11 мкмоль/кг в сутки в диапазоне от 350 до 567 мкмоль/кг. Величина парциального давления CO_2 (pCO_2) в водах наиболее пересыщенных кислородом снизилась до 108 мккатм. Доминирующим видом в фитопланктоне в районе цветения была морская диатомовая водоросль *Thalassiosira nordenskioldii*. Цветение началось когда лед толщиной 40 см практически достиг дна в районе мелководного устьевого бара. Цветение происходило при неизменных условиях освещенности и связано с установлением стабильности водной толщи в результате блокирования льдом водообмена эстуария и снижения расхода реки.

Около границы проникновения клина осолоненных вод, на расстоянии 29 км от устьевого бара реки, наблюдалась противоположная направленность изменчивости исследованных характеристик в придонном слое воды. При концентрации хлорофилла "а" 1 мкг/л концентрация O_2 уменьшалась на протяжении месяца от 140 до 53 мкмоль/кг, а величина pCO_2 достигла 4454 мккатм при солености 15.2‰.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 21-77-00028).

ПОТОКИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$ В ЧЕРНОМ МОРЕ

Слизченко Е.В.¹, Бежин Н.А.^{1,2}, Шибецкая Ю.Г.¹, Козловская О.Н.¹

¹Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

²Севастопольский Государственный Университет, г. Севастополь

Ключевые слова: ^{210}Po , ^{210}Pb , взвешенный органический углерод, осадительный метод, Черное море.

^{210}Po ($T_{1/2} = 138,4$ лет) и ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22,3$ лет) используются как трассеры для оценки потока взвешенного вещества в верхних слоях океана. Поток взвешенного органического углерода (Particulate organic carbon (POC)), оценивающийся с помощью неравновесия пары ^{210}Pb и ^{210}Po , может быть использован в качестве дополнительного инструмента для изучения потока частиц, учитывая прямое биологическое поглощение ^{210}Po клеточным материалом. Различия между этими радиоизотопами в отношении их периодов полураспада, реакционной способности частиц и средства к поглощению в морской воде дают возможность получить дополнительную информацию о процессах, происходящих в толще воды [1].

Наиболее распространенным использованием неравновесия пары ^{210}Pb и ^{210}Po является оценка скорости осаждения взвешенных частиц и скорости перемешивания водных масс, а в последнее время неравновесие ^{210}Pb и ^{210}Po используется для оценки потока POC из поверхностного слоя в толщу вод [2].

Известно, что в Черном море концентрация ^{210}Pb в растворенной форме и во взвешенном веществе ранее не определялась, нет данных по потокам ^{210}Pb и ^{210}Po .

Поэтому целью настоящей работы является оценка возможности извлечения и определения растворенных ^{210}Pb и ^{210}Po по модифицированной осадительной методике из 20 л морской воды и анализ полученных впервые для Черного моря данных для выявления особенностей изменчивости поверхностного и вертикального распределения концентраций и потоков ^{210}Pb и ^{210}Po в растворенной форме.

В ходе 121-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» в апреле – мае 2022 г. было отобрано 15 проб морской воды в поверхностном слое и 17 проб для пяти вертикальных профилей вдоль южного берега Крыма и выполнено концентрирование растворенных ^{210}Pb и ^{210}Po в них с использованием уникальной осадительной методики, которая включает радиохимическую подготовку с последующим электрохимическим осаждением ^{210}Pb (^{210}Bi) и ^{210}Po и позволяет определять концентрацию растворенного ^{210}Pb и ^{210}Po буквально в 20 л морской воды, что существенно упрощает пробоотбор и дальнейшие решение океанологических проблем.

В результате анализа проб впервые для Черного моря выявлены особенности изменчивости поверхностного и вертикального распределения концентраций и потоков ^{210}Pb и ^{210}Po в растворенной форме на изученном полигоне в Чёрном море. Активность ^{210}Pb в поверхностном слое лежала в диапазоне от 1,35 до 1,74 Бк/м³ и составляла в среднем $1,52 \pm 0,15$ Бк/м³, активность ^{210}Po в поверхностном слое лежит в диапазоне от 0,48 до 0,69 Бк/м³ и составляет в среднем $0,60 \pm 0,06$ Бк/м³. Полученные данные согласуются с литературными, полученными различными международными группами в различных уголках Земного шара [3]. Вертикальные профили объемной активности ^{210}Pb и ^{210}Po были получены на пяти станциях. Полученное отношение $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ лежит в пределах 0,3 – 0,6, что также согласуется с литературными данными [4, 5].

С использованием модели стационарного состояния были рассчитаны потоки растворенного ^{210}Pb и ^{210}Po в Черном море. Значение потока ^{210}Pb лежало в диапазоне от 1,98 до 2,47 мБк/(м²·сут) и составляло в среднем $2,25 \pm 0,22$ мБк/(м²·сут), значение потока ^{210}Po лежало в диапазоне от 3,51 до 9,78 мБк/(м²·сут) и составляло в среднем $5,62 \pm 0,56$ мБк/(м²·сут). Получен-

ные значения потоков коррелируются с соленостью, коэффициенты корреляции для большинства полученных данных более 90 %.

К сожалению, в 121 рейсе НИС «Профессор Водяницкий» впервые отрабатывалась методика осаждения, поэтому пробы для оценки концентраций ^{210}Pb и ^{210}Po во взвешенном веществе отобраны не были. В ходе 125.2 рейса НИС «Профессор Водяницкий» в декабре 2022 г. впервые были отобраны пробы для определения активности ^{210}Pb и ^{210}Po как в растворенной, так и во взвешенной форме. К сожалению, радиохимические методики получения счетного образца время затратные, и в настоящее время отобранные пробы еще не обработаны, однако по полученным данным будут определены потоки взвешенного вещества, что в дальнейшем позволит перейти к задаче, по оценке потока РОС.

Таким образом, была оптимизирована и отработана уникальная осадительная методика определения ^{210}Pb и ^{210}Po в морской воде. Показана высокая эффективность осадительного метода, позволяющего определять концентрацию растворенного ^{210}Pb и ^{210}Po буквально в 20 л морской воды. Впервые изучена изменчивость поверхностного и вертикального распределения концентраций и потоков ^{210}Pb и ^{210}Po в растворенной форме в Черном море, установленные значения согласуются с литературными, полученными в различных уголках Земного шара.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Океанологические процессы» №FNNN-2021-0004), а также при финансовой поддержке Севастопольского государственного университета в рамках проекта 42-01-09/169/2021-7.

Список литературы

- 1) Verdeny E., Masqué P., García-Orellana J., Hanfland C., Cochran J.K., Stewart G. POC export from ocean surface waters by means of $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ and $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ disequilibria: A review of the use of two radiotracer pairs // Deep-sea Research Part II-topical Studies in Oceanography. Vol 56. 2009. P. 1502–1518.
- 2) Wei C., Lin S., Sheu D., Chou W., Yi M., Santschi P.H., Wen L. Particle-reactive radionuclides (^{234}Th , ^{210}Pb , ^{210}Po) as tracers for the estimation of export production in the South China Sea // Biogeosciences Discussions. Vol. 8. 2011. P. 9671–9707.
- 3) Huina H., Xiao L., Chunyan R., Renming J., Yusheng Q., Minfang Z., Min C. $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ Disequilibria and Its Estimate of Particulate Organic Carbon Export Around Prydz Bay, Antarctica // Frontiers in Marine Science. Vol. 8. 2021. P. 701014.
- 4) Elisabet V., Pere M., Garcia-Orellana J., Hanfland C., Kirk Cochran J., Gillian M.S. POC export from ocean surface waters by means of $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ and $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ disequilibria: A review of the use of two radiotracer pairs // Deep-sea Research Part II-topical Studies in Oceanography. Vol 56. 2009. P. 1502–1518.
- 5) Verdeny E., Masqué P., Maiti K., Garcia-Orellana J., Bruach J.M., Mahaffey C, Benitez-Nelson C.R. Particle export within cyclonic Hawaiian lee eddies derived from ^{210}Pb – ^{210}Po disequilibrium // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. Vol 55. 2008. P.1461-1472.

**ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ПРОЛИВЕ БРАНСФИЛД
(ЮЖНЫЙ ОКЕАН) ПО ДАННЫМ РЕЙСА 87
НИС «АКАДЕМИК МСТИСЛАВ КЕЛДЫШ»**

Холмогоров А.О.¹, Сырбу Н.С.¹, Савельева Е.Э.², Рогожина Е.А.², Ревенко М.А.²

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

²Дальневосточный Федеральный Университет, г. Владивосток

Ключевые слова: метан, температура, соленость, система течений, пролив Брансфилд, Южный океан.

В работе представлены результаты подробных газогеохимических исследований метана в водной толще проливов Брансфилд, Антарктик и моря Уэдделла в контексте системы течений рассматриваемого района, что позволило оценить влияние течений на распределение полей метана и наметить перспективы для дальнейших исследований.

Материал для исследований был получен в 87-м рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" в период с 7 декабря 2021 года по 5 апреля 2022 год. Отбор воды осуществлялся 24-позиционной системой «Rosset» оснащенной CTD-зондом «INDRONAUT» (Италия) на отдельных горизонтах с учетом вертикального распределения температуры, солености и других выявленных в ходе CTD-зондирования гидрологических параметров. Для анализа содержания метана во всех образцах воды использовался метод равновесных концентраций «HeadSpace» [1]. Для анализа газового состава использовался газовый хроматограф «Кристалл Люкс 4000».

Выполнено 3 разреза, включающие 24 газогеохимические станции (200 проб). Анализ проб морской воды, отобранной из батометров в диапазоне глубин 2 – 1767м выявил концентрации метана 2.47 – 10.95 нМ/л.

Максимальные концентрации метана (10.95 нМ/л) наблюдаются на склоне желоба пролива у Южных Шетландских островов на восточном и центральном разрезах на горизонтах 0-500м. Здесь на всех трех разрезах отчетливо различимо ядро повышенных концентраций метана с центром на глубине 400м и имеющее горизонтальный масштаб около 10 км. Это может быть обусловлено переносом насыщенных метаном вод течением пролива Брансфилд, направленным на восток [2]. Наличие данной струи, переносящей в себе повышенные концентрации метана подтверждается данными температуры и солености [3].

В поверхностном и подповерхностном (до глубины 200м) водном слоях на центральном и восточном разрезах выделяется область повышенных концентраций (7.63 нМ/л), что также может быть связано с гидрологическим режимом – существование вихрей на центральной оси пролива [2].

Центральный разрез пролива территориально повторил разрез, выполненный в ходе экспедиции НИС «Академик Мстислав Келдыш» (79 рейс), 2020г. Согласно результатам газогеохимических исследований 2020г. на дне пролива обнаружена зона повышенных концентраций метана, локальный участок газовой разгрузки гидротермальной природы, связанный с системой разломов в координатах 62°40'3" ю.ш. 59°21'40" з.д. [4]. В работе описано, что метаносодержащий гидротермальный флюид вызывает увеличение содержания метана в воде с локальным максимумом 43 нМ/л. Также на этом участке выявлено наибольшее количество термофильных метанотрофных бактерий, находящихся в придонном слое воды [5]. Однако в рамках экспедиции рейса 87 НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2021-2022) данная аномалия либо результаты ее активности обнаружены не были. Нестабильность геологических источников пролива, вероятно, контролируется сейсмической обстановкой региона и нуждается в дальнейшем изучении.

подавляющая часть водной массы пролива Брансфилд характеризуется низкими значениями концентрации метана, что говорит об отсутствии интенсивных и стабильных геологических

источников. В целом, район характеризуется невысокими значениями скоростей синтеза и окисления метана. На всех станциях бактериальная утилизация метана преобладала над его синтезом, что говорит о присутствии источника метана [5]. В ходе работ в Южном океане в рамках рейса 87 НИС «Академик Мстислав Келдыш» локальные придонные аномалии концентраций метана обнаружены не были. Вероятно, что повышение концентрации метана в слое 0-500м связано с перемещением водных масс из глубоководной части пролива Антарктика, где на дне существуют еще не закартированные участки газовой разгрузки. Найденная метановая аномалия [4] связана с эндогенными процессами в рифтогенной сейсмоактивной зоне, а локализация источника обусловлена особенностями тектонического строения дна пролива Брансфилд и требует более детального дальнейшего изучения. В свете полученных данных можно сделать вывод, что в Атлантическом секторе Южного океана могут находиться районы быстрого и дальнего переноса аномальных полей метана в толще вод, возможно вплоть до поверхности.

Проведенное исследование на стыке газогеохимии и гидрологии позволило изучить картину распределения растворенного во воде метана и его транзит посредством сложной системы течений исследуемого региона. Показано, что растворенный метан переносится системой течений региона.

Работа выполнена в рамках Госбюджетной темы № АААА-А19-119122090009-2

Список литературы

- 1) Wiesenburg, D.A., Guinasso, N.L. Equilibrium solubility of methane, carbon monoxide, and hydrogen in water and sea water.// *Journal of Chemical & Engineering Data*. Vol. 24(4). 1979. P. 356–360.
- 2) Sangrà, P.; Gordo, C.; Hernández-Arencibia, M.; Marrero-Díaz, A.; Rodríguez-Santana, A.; Stegner, A.; Martínez-Marrero, A.; Pelegrí, J.; Pichon, T. The Bransfield Current System.// *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* Vol. 58. 2011. P.390–402.
- 3) Frey, Dmitry; Krechik, Viktor; Morozov, Eugene; Drozd, Ilya; Gordey, Alexandra; Mekhova, Olga; Mukhametianov, Rinat; Ostroumova, Sofia; Smirnova, Daria; Zuev, Oleg (2022), “CTD and LADCP measurements in the Bransfield Strait in February-March 2022”, *Mendeley Data*, V1, doi: 10.17632/69v8599btr.1
- 4) Polonik, N. S., Ponomareva, A. L., Shakirov, R. B., Obzhairov, A. I. Methane Distribution in Antarctic Sound (Southern Ocean).// *Oceanology*. Vol. 61(4). 2021. P. 469-471. DOI 10.1134/S0001437021040135.
- 5) Ponomareva, A.L., Polonik, N.S., Kim, A.V., Shakirov, R.B. Detection of Thermophilic Methanotrophic Microbial Communities in the Water Column of the Bransfield Strait (Antarctica) // In: Morozov E.G., Flint M.V., Spiridonov V.A. (eds) *Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean*.// *Advances in Polar Ecology*. Vol. 6. Springer, Cham. 2021. P. 209-215 http://doi.org/10.1007/978-3-030-78927-5_15

СОЗДАНИЕ САЙТА ПО СОРТИРОВКЕ РУКОВОДЯЩИХ ДОКУМЕНТОВ В ОБЛАСТИ ГИДРОХИМИИ

Честнов А.И.

*Институт Информационных Систем и Геотехнологий при Российском Государственном
Гидрометеорологическом Университете, г. Санкт-Петербург*

Ключевые слова: гидрохимия, руководящий документ, сортировка документации, сбор документации, интернет-сайт.

На сегодняшний день существует огромное количество официальной документации в виде руководящих документов. Данные руководящие документы регламентируют методики выполнения измерений различных показателей в разных диапазонах, ведение наблюдений за состоянием вод и мониторинг загрязнения, а также, методики химических анализов [1].

Разработку, внедрение и публикацию нормативной документации в области гидрохимических изысканий осуществляет Гидрохимический институт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), основанный в 1920 году. На сегодняшний день учреждение выполняет огромное количество функций в области изучения проблематики загрязнений вод, их мониторинга, вместе с тем являясь аналитическим центром по обработке гидрохимической информации [2].

Идея для создания сортировки руководящих документов возникла для обеспечения удобства сотрудников Российско-германской лаборатории полярных и морских исследований имени Отто Юльевича Шмидта (ОШЛ), основанной в 1999 году. Их миссия заключается в поддержке и развитии исследовательской деятельности в области полярных и морских исследований с акцентом на квалификацию студентов и младших ученых. С момента своего открытия ОШЛ предоставил ученым, аспирантам и магистрантам из более чем сорока немецких и российских университетов и научно-исследовательских институтов платформу для их совместных исследований. ОШЛ основана на 30-летнем опыте планирования и проведения экспедиций, рабочих встреч и обучения молодых ученых [3].

Сотрудники лаборатории принимают участие в морских экспедициях осуществляемых Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (АНИИ), занимаясь отбором проб и проводя химический анализ собранных образцов с последующим занесением результатов в отчёты. Во время работы в экспедициях, сотрудники применяют руководящие документы (РД), используя их как методические указания [4].

Большой проблемой является отсутствие сортировки руководящих документов, из-за этого, при поиске нужных методичек, тратится большое количество времени, ввиду того, что на официальном сайте Гидрохимического института документы представлены лишь по своим порядковым номерам. На платформе бесплатного хостинг-сервиса был создан список отсортированных документов для экономии времени и удобства в виде интернет-сайта.

Сайт создан и имеет название Hydrochemistry вики, он представляет собой портал, где собраны руководящие документы, находящиеся исключительно в открытом доступе на сторонних сайтах уже в оцифрованном виде. Выбор платформы для создания сайта был сделан в пользу сервиса Fandom, бесплатного хостинга для создания сайта, аналога Википедии. На основной странице «полный список руководящих документов» собран список из руководящих документов, необходимый в экспедициях для отбора проб и анализа. Интерактивное содержание позволяет легко и удобно ориентироваться в них. У каждого документа написана область его применения для получения большего представления о нём и оставлена ссылка на легальный источник, где документ можно свободно скачать для дальнейшего использования в формате PDF [5, 6].

На данный момент создан один вид сортировки документов, а именно по химическим элементам, анализ которых регламентирует руководящий документ, ввиду того, что несколько документов могут выполнять данную функцию. Вместе с тем, на сайте представлены статьи, подробнее описывающие химический элемент, эти описания взяты из предисловий РД. В дальнейшем, планируется расширение сайта для его превращения в большой информационный портал. Это будет осуществлено с созданием дополнительных статей, где будут присутствовать дополнительные источники литературы и данные для подробного ознакомления пользователей с ним.

Список литературы

- 1) Гидрохимический институт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Нормативные документы. [электронный ресурс]. URL:https://gidrohim.com/normative_docs // (дата обращения 08.01.2023)
- 2) Гидрохимический институт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. [электронный ресурс]. URL:<https://gidrohim.com/> (дата обращения 08.01.2023)
- 3) Российско-Германская Лаборатория полярных и морских исследований им. О.Ю. Шмидта. ОШЛ. [электронный ресурс]. URL:<https://www.otto-schmidt-laboratory.de/home> (дата обращения 08.01.2023)
- 4) ААНИИ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, отдел лаборатории ОШЛ [электронный ресурс]. URL:<https://www.aari.ru/departments/rossiisko-germanskaya-laboratoriya-polyarnykh-i-morskikh-issledovaniim.-o.-yu.shmidta> (дата обращения 08.01.2023)
- 5) Fandom, описание функционала сервиса и история создания [электронный ресурс]. URL:<https://wikies.fandom.com/wiki/%D0%A4%D1%8D%D0%BD%D0%B4%D0%BE%D0%BC> (дата обращения 08.01.2023)
- 6) Главная страница сайта Hydrochemistry вики [электронный ресурс]. URL:https://hydrochemistryinfo.fandom.com/ru/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%BE%D0%BA_%D0%BE%D1%82%D0%BA%D1%80%D1%8B%D1%82%D1%8B%D1%85_%D0%A0%D0%94 (дата обращения 08.01.2023)

ОЦЕНКА СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ БИОДИНАМИКИ ФОСФОРА ПО КОСМОГЕННЫМ ИЗОТОПАМ ^{32}P , ^{33}P

Фролова М.А.¹, Шибецкая Ю.Г.^{1,2}, Слизченко Е.В.², Бежин Н.А.^{1,2}, Тананаев И.Г.^{1,3}

¹ Севастопольский государственный университет, г. Севастополь

² Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

³ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва

Ключевые слова: сорбенты, ПАН- $\text{Fe}(\text{OH})_3$, фосфор, ^{32}P , ^{33}P , биодинамика фосфора, Балаклавское побережье.

Одним из немногих инструментов, позволяющим изучать количественные параметры биодинамики фосфора в морской воде, являются короткоживущие изотопы фосфора космогенного происхождения ^{32}P и ^{33}P [1, 2], имеющие единственный источник поступления – атмосферные выпадения и малые периоды полураспада 25,35 и 14,27 суток соответственно.

Некоторые аспекты цикла фосфора в Черном море изучены слабо, а именно практически неизвестны значения параметров времени, скорости, степени обращения ^{33}P в неорганический и органический фосфат, концентрации различных химических форм органического фосфора. Данный аспект является важным, поскольку в условиях восстановительной среды сероводородного слоя концентрация восстановленных форм фосфора – фосфонатов и фосфинатов – может быть значительна. Относительно недавние исследования [3] показывают, что эти формы могут играть ключевую роль в биогеохимическом цикле фосфора в океане.

Данная работа является логическим продолжением статей [4, 5], в которых представлены и всесторонне охарактеризованы сорбенты на основе акрилатного волокна и гидроксида железа(+3), полученные различными методами: Fe-NH – с использованием негидролизованного полиакрилонитрильного (ПАН) волокна и осаждением $\text{Fe}(\text{OH})_3$ аммиаком; Fe-SF – с использованием готового Na_2FeO_4 ; Fe-H – с использованием предварительно гидролизованного ПАН с осаждением $\text{Fe}(\text{OH})_3$ аммиаком [6].

Проведена оценка эффективности извлечения изотопов фосфора из морской воды различными сорбентами. Установлено, что наибольшая эффективность извлечения фосфора достигается при использовании сорбента Fe-H при скорости пропускания морской воды 1 – 4 к.о./мин. На основании полученных данных разработана методика извлечения изотопов ^{32}P и ^{33}P из морской воды сорбентом Fe-H.

Для оценки сезонной изменчивости биодинамики фосфора выполнены экспедиционные работы в район Балаклавского побережья в декабре 2021 г., апреле 2022 г., июле 2022 г. и октябре 2022 г. Пробы на содержание ^{32}P и ^{33}P в растворенной и взвешенной форме были отобраны с четырех горизонтов (3, 10, 20 и 30 м). На основании данных отношения $^{33}\text{P}/^{32}\text{P}$ определены параметры биодинамики фосфора. Установлена корреляция времени обращения фосфора с температурой воды, минимальные значения периода обращения наблюдались в наиболее теплые периоды – июле (2,5 сут в растворенную форму, 11,1 сут во взвешенную форму) и октябре (3,2 сут в растворенную форму, 12,7 сут во взвешенную форму), максимальные в более холодные периоды – декабре (4,5 сут в растворенную форму, 13,9 сут во взвешенную форму) и апреле (4,9 сут в растворенную форму, 15,2 сут во взвешенную форму).

Анализ полученных параметров биодинамики фосфора, а именно скорости и степени обращения весной (скорость обращения 22,6 мкмоль/($\text{м}^3 \cdot \text{сут}$) в растворенную форму, 6,2 мкмоль/($\text{м}^3 \cdot \text{сут}$) во взвешенную форму, степень обращения 678 мкмоль/($\text{м}^2 \cdot \text{сут}$) в растворенную форму, 187 мкмоль/($\text{м}^2 \cdot \text{сут}$) во взвешенную форму) и летом (скорость обращения 22,1 мкмоль/($\text{м}^3 \cdot \text{сут}$) в растворенную форму,

6,3 мкмоль/(м³·сут) во взвешенную форму, степень обращения 663 мкмоль/(м²·сут) в растворенную форму, 189 мкмоль/(м²·сут) во взвешенную форму), показывает повышенные значения в сравнении с параметрами, полученными зимой (скорость обращения 16,1 мкмоль/(м³·сут) в растворенную форму, 6,1 мкмоль/(м³·сут) во взвешенную форму, степень обращения 484 мкмоль/(м²·сут) в растворенную форму, 184 мкмоль/(м²·сут) во взвешенную форму) и осенью (скорость обращения 13,4 мкмоль/(м³·сут) в растворенную форму, 4,1 мкмоль/(м³·сут) во взвешенную форму, степень обращения 401 мкмоль/(м²·сут) в растворенную форму, 124 мкмоль/(м²·сут) во взвешенную форму). Таким образом весной несмотря на более низкую температуру воды, параметры биодинамики фосфора выше. По нашему мнению, это связано с повышенным поверхностным стоком вследствие обилия дождевых осадков в период с марта по апрель 2022 года. В результате в морскую среду поступает фосфор не только терригенного происхождения, но и антропогенного (бытовые и сельскохозяйственные стоки). В частности, первое внесение удобрений в обилие виноградников Балаклавы приходится на конец марта – начала апреля, что несомненно влияет на параметры биодинамики. Повышение параметров в летний период объясняется курортной деятельностью в Балаклаве, негативно влияющей на состояние морской экосистемы.

Таким образом, в районе Балаклавского побережья выявлена сезонная изменчивость параметров биодинамики фосфора. Определены повышенные значения параметров биодинамики фосфора в весенне-летний период, что можно объяснить особенностью хозяйственно-курортной деятельности Балаклавы, негативно влияющей на состояние морской экосистемы.

Работа выполнена в рамках проекта Севастопольского государственного университета № 42-01-09/169/2021-7, а также государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Океанологические процессы» № FNNN-2021-0004).

Список литературы

- 1) Lal D. An overview of five decades of studies of cosmic ray produced nuclides in oceans // Science of the Total Environment. Vol. 237–238.1999. P. 3–13.
- 2) Benitez-Nelson C.R. The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems // Earth-Science Reviews. Vol. 51. No. 1-4. 2000. P. 109–135.
- 3) Benitez-Nelson C. The missing link in oceanic phosphorus cycling? // Science. Vol. 348, No. 6236. 2015. P. 759–760.
- 4) Bezhin N.A., Frolova M.A., Dovhyi I.I., Kozlovskaya O.N., Slizchenko E.V., Shibetskaia I.G., Khlystov V.A., Tokar' E.A., Tananaev I.G. The Sorbents Based on Acrylic Fiber Impregnated by Iron Hydroxide (III): Production Methods, Properties, Application in Oceanographic Research // Water. Vol. 14, No. 15. 2022. P. 2303.
- 5) Bezhin N.A., Frolova M.A., Kozlovskaya O.N., Slizchenko E.V., Shibetskaia Yu.G., Tananaev I.G. Physical and chemical regularities of phosphorus and beryllium recovery from the seawater by acrylate fiber based on iron(+3) hydroxide // Processes. Vol. 10. No. 10. 2022. P. 2010.
- 6) Krishnaswami S., Lal D., Somayajulu B.L.K., Dixon F.S., Stonecipher S.A., Craig H. Silicon, radium, thorium, and lead in seawater: In-situ extraction by synthetic fibre // Earth and Planetary Science Letters. Vol. 16. No. 1. 1972. P. 84–90.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОЖИВУЩИХ ИЗОТОПОВ РАДИЯ В ЧЕРНОМ МОРЕ

Шибецкая Ю.Г.^{1,2}, Козловская О.Н.¹, Разина В.А.¹, Бежин Н.А.^{1,2}

¹Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

²Севастопольский государственный университет, г. Севастополь

Ключевые слова: ^{226}Ra , ^{228}Ra , Черное море, ПАН- MnO_2 .

Природные радионуклиды находят широкое применение для исследования процессов вертикального и горизонтального переносов в океане, потоков взвешенного вещества. Так долгоживущие изотопы радия используются при исследовании взаимодействия морских и прибрежных вод в прибрежных районах [1]. В местах поступления пресных вод наблюдаются повышенные значения активностей изотопов радия, что свидетельствует о тесной связи между содержанием изотопов радия с соленостью вод и может быть использовано для определения содержания растворенных веществ в различных видах вод, поступающих в морскую акваторию [2].

Необходимо отметить, что согласно литературным данным [3] концентрация ^{226}Ra увеличивается с глубиной, а ^{228}Ra уменьшается, это связано с различными периодами полураспада данных изотопов и их соотношением в источниках поступления. Поэтому их отношение и его пространственное изменение является важной характеристикой для оценки поступления подземных вод.

Целью работы является выявление особенностей пространственной изменчивости поля концентраций долгоживущих изотопов радия в Черном море.

В ходе 121-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» в апреле – мае 2022 г. было отобрано 50 проб морской воды в поверхностном слое вдоль южного берега Крыма и выполнено концентрирование радионуклидов (^{226}Ra , ^{228}Ra) в них с использованием сорбента ПАН- MnO_2 . По окончании экспедиционных исследований в береговой лаборатории пробы смывались с сорбента 2 моль/л HCl и гидроксиламином. Затем производилось соосаждение ионов радия с сульфатом бария. Осадок (100 мг) переносили на подложку. Подготовленный таким образом счетный образец выдерживали 4 – 5 суток в чашке Петри от времени отделения изотопов радия и измеряли на альфа-бета-радиометре УМФ-2000 (ООО НПП «Доза», г. Зеленоград, Россия) в течение не менее 8 ч несколько раз, повторно измеряли счетный образец через 10 – 12 суток.

В результате анализа проб получены данные о распределении радионуклидов (^{226}Ra , ^{228}Ra) в поверхностном слое вод на изученном полигоне в Черном море. Анализ данных показал, что повышенные концентрации ^{228}Ra соответствовали пониженному содержанию ^{226}Ra . Средняя концентрация ^{228}Ra составила 49,1 dpm/m^3 (с диапазоном концентраций 17,2 – 172,3 dpm/m^3), ^{226}Ra – 78,3 dpm/m^3 (с диапазоном концентраций 49,0 – 169,8 dpm/m^3).

В исследуемом районе влияние речного стока исключено, однако максимальные значения содержания изотопов радия (^{226}Ra – 169,8 dpm/m^3 , ^{228}Ra – 172,3 dpm/m^3) наблюдаются в районе Феодосийского залива, при этом распределения не наблюдалось, но было замечено повышенные концентрации биогенных элементов. Это может быть связано как с наличием неизвестного источника пресной воды, так и с поступлением радия с природными источниками метана на дне Феодосийского залива [4].

Кроме того, было отмечено, что высокое содержание ^{226}Ra (135,7 dpm/m^3) соответствовало минимально полученному содержанию ^{228}Ra (17,2 dpm/m^3) в районе г. Алушта. Отношение $^{228}\text{Ra} / ^{226}\text{Ra}$ в районе г. Алушты указывает на наличие водных масс отличных от поверхностных. Однако в данном районе не наблюдалось значительных наземных стоков пресной воды, но есть пониженные значения температуры и повышенное значение солености с фосфатами, что свидетельствует о явлении апвеллинга.

Для всей исследуемой области, кроме района г. Алушты (района апвеллинга) была получена высокая корреляционная зависимость ^{228}Ra от ^{226}Ra с коэффициентом корреляции более 0,90. Таким образом на распределение радия может влиять не только распространение пресных вод в прибрежных и глубоководных районах, но и явление апвеллинга.

Таким образом, подробно изучены особенности пространственной изменчивости поля концентраций долгоживущих изотопов радия в Черном море вдоль Южного берега Крыма весной 2022 г. Показаны высокие корреляционные зависимости отношения концентрации ^{228}Ra к ^{226}Ra для всей исследуемой области, кроме района апвеллинга.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Океанологические процессы» № FNNN-2021-0004), при финансовой поддержке Севастопольского государственного университета в рамках проекта 42-01-09/169/2021-7.

Список литературы

- 1) IAEA. IAEA-TECDOC-1595, Nuclear and Isotopic Techniques for the Characterization of Submarine Groundwater Discharge in Coastal Zones. – Vienna: IAEA, 2008. – 200 p.
- 2) Hwang D.-W., Lee In-S., Choi M., Kim T.-H. Estimating the input of submarine groundwater discharge (SGD) and SGD-derived nutrients in Geoje Bay, Korea using ^{222}Rn -Si mass balance model // Marine Pollution Bulletin. Vol. 110, № 1. 2016. P. 119-126.
- 3) Tazoe H., Obata H., Hara T., Inoue M., Tanaka T., Nishioka J. Vertical Profiles of ^{226}Ra and ^{228}Ra Activity Concentrations in the Western Subarctic Gyre of the Pacific Ocean // Frontiers in Marine Science. Vol. 9. 2022. P. 824862.
- 4) Малахова Т.В., Мансурова И.М., Малахова Л.В., Минина Н.В., Заговенкова А.Д. Особенности распределения метана в эвфотическом слое северной части Черного моря в летний сезон 2018 года (по данным 102-го рейса НИС «Профессор Водяницкий») // Морской гидрофизический журнал. Т. 36. № 2. 2020. С. 186–201.

ИСТОЧНИКИ МЕТАНА НА ШЕЛЬФЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

Щербакова К.П.^{1,2}, Космач Д.А.^{1,2}, Черных Д.В.^{1,2}, Шахова Н.Е.^{1,2}, Семилетов И.П.^{1,2}

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

²Национальный Томский исследовательский государственный университет, г. Томск

Ключевые слова: цикл углерода, изменения климата, стабильные изотопы, метан.

Восточно-Сибирский шельф (ВСШ), сформированный в результате трансгрессии моря в раннем голоцене, является самым широким и мелководным шельфом Мирового Океана. На ВСШ сосредоточено более 30% мирового запаса органического углерода в виде основных парниковых газов – метана (CH₄) и углекислого газа, (CO₂) законсервированного в толще подводной мерзлоты (ПМ) в свободной форме или в виде газовых гидратов [1, 2]. В результате прогрессирующей деградации ПМ, в современный биогеохимический цикл могут быть вовлечены гигантские количества CH₄ и CO₂, что может привести к труднопредсказуемым климатическим последствиям.

Многолетние данные, собранные в результате комплексных экспедиционных исследований в морях Восточной Арктики, показали, что в районах дестабилизации подводной мерзлоты происходит массивованный пузырьковый перенос CH₄ из донных отложений через водную толщу в атмосферу в районах разгрузки-сипах. Количество CH₄, поступающего из сипов, определяется степенью деградации ПМ и может изменяться на пять порядков от 0,001 до 1000 грамм с кв. м в сутки [3, 4].

Представление об источниках, способствующих наблюдаемой эмиссии метана, является предпосылкой для прогнозирования на ближайшие десятилетия. Однако генезис CH₄, переносимого сипами, в настоящее время не ясен. Следует различать 1) микробный источник CH₄, образующийся в неглубоких отложениях во время раннего диагенеза или при таянии подводной вечной мерзлоты, 2) залежи предварительно сформированного метана, такие как метан, высвобождающийся при разложении газовых гидратов, и 3) термогенный (природный) газ. Для определения источника CH₄ в представленной работе был применен анализ стабильных изотопов метана $\delta^{13}\text{C}$, δD , а также определено содержание радиоуглерода $\Delta^{14}\text{C}$, позволяющее получить информацию о его генезисе.

В работе представлены данные, полученные в центральной и прибрежной частях моря Лаптевых в ходе ряда морских экспедиций. Отбор проб осуществлялся пробоотборным устройством Cagouel с батометрами объемом 10 л. Экстракция образцов проводилась методом парофазного анализа с последующим определением концентраций на газовом хроматографе *in situ*. Изотопный состав CH₄ определялся методом хромато-масс-спектрометрии в Стокгольмском университете. Наблюдаемые в 2014 г. концентрации растворенного в воде CH₄ варьировались от 3 до 1500 нмоль, а его средняя концентрация составляла 151 нмоль, что является перенасыщением водной толщи на 3800%. Изотопный состав CH₄ сиповых областей показал сильные вертикальные и горизонтальные градиенты указывающие на термогенную природу газа: $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4 = (-42.6 \pm 0.5)/(-55.0 \pm 0.5) \text{‰}$, $\delta\text{D}-\text{CH}_4 = (-136.8 \pm 8.0)/(-158.1 \pm 5.5) \text{‰}$. Полученные значения $\Delta^{14}\text{C}-\text{CH}_4$ составили $993 \pm 19/-1050 \pm 89\text{‰}$ и являются сильно обедненными, что говорит о том, что это древний газ [2].

Сравнение этих результатов с полученными ранее (2007-2012 гг.) [5]) дает основание предположить межгодовую изменчивость мощности тех или иных источников, что проявляется в изменении изотопного почерка метана в одних и тех же сипах. В докладе обсуждаются ранее опубликованные данные, дополненные новыми авторскими результатами.

Финансирование исследований выполняется при поддержке Российского научного фонда (грант 21-77-30001, рук. И.П. Семилетов), и Министерства науки и высшего образования (грант “Приоритет -2030”, Национальный Томский исследовательский государственный университет)

Список литературы

- 1) Shakhova, N., Semiletov, I., Chuvilin E. Understanding the Permafrost–Hydrate System and Associated Methane Releases in the East Siberian Arctic Shelf // *Geosciences*. Vol. 9. 2019. P. 251.
- 2) Steinbach, J., Holmstrand, H., Shcherbakova, K., Kosmach, D., Brüchert, V., Shakhova, N., Salyuk, A., Sapart, C.J., Chernykh, D., Noormets, R., Semiletov, I., Gustafsson, Ö. Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol. 118, № 10. 2021. P. e2019672118
- 3) Chernykh, D., Yusupov, V., Salomatin, A., Kosmach, D., Shakhova, N., Gershelis, E., Konstantinov, A., Grinko, A., Chuvilin, E., Dudarev, O., Koshurnikov, A., Semiletov, I. Sonar estimation of methane bubble flux from thawing subsea permafrost: A case study from the Laptev sea shelf // *Geosciences*. V. 10. № 10. 2020. P. 1-14.
- 4) Shakhova, N., Semiletov, I., Sergienko, V., Lobkovsky, L. et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*. Vol. 373. № 2052. 2015. P.13
- 5) Sapart, C. J., Shakhova, N., Semiletov, I., Jansen, J., Szidat, S., Kosmach, D., Dudarev, O., van der Veen, C., Egger, M., Sergienko, V., Salyuk, A., Tumskey, V., Tison, J.L., Rockmann, T. The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis // *Biogeosciences*. Vol.14, № 9, 2017. P. 2283-2292

СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВРЕМЕНИ ЭКСПОЗИЦИИ В
ТОКСИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ БИХРОМАТА КАЛИЯ НА *ARTEMIA SALINA*

Артына Н.К., Григорьев Ю.С., Шашкова Т.Л., Карпов М.В.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Ключевые слова: Artemia salina, биотестирование, чувствительность, температура среды, время экспозиции, науплиусы, бихромат калия.

Жаброногие солоноводные рачки *Artemia salina* являются базовыми тест-организмами при определении токсичности загрязняющих веществ, экологической оценке и анализе состояния, как морских и солёных водных объектов, так и солесодержащих отходов производства и потребления. В настоящее время в мире выполняются различные тесты на токсичность с артемиями [1]. Проводятся краткосрочные острые и долгосрочные хронические опыты [2,3]. В Российской Федерации для целей государственного экологического контроля в основном используют острые биотесты на артемиях [4,5]. Однако существующие российские методики и рекомендации имеют различия в регламенте проведения процедуры. К основным расхождениям помимо состава культивационных сред, посадки науплиусов, относятся также температура и время экспозиции [4,5]. Следует отметить, что ряд методик биотестирования весьма продолжительны в своем исполнении, что не позволяет их использовать для оперативного реагирования на изменения экологической ситуации в водоемах. К тому же, большинство методов не обеспечены оборудованием для создания стандартных условий работы с тест-организмами и автоматизацией самого процесса биотестирования [6]. Представляет интерес исследование возможности сокращения времени экспозиции путем повышения температуры при проведении биотеста. При этом увеличение температуры может не только активизировать жизнедеятельность тест-объектов, но и оказывать влияние на их жизненный цикл.

В связи с этим, целью настоящей работы являлось изучение совместного влияния температуры и времени экспонирования на токсическое воздействие бихромата калия на солоноводные рачки *Artemia salina*.

В качестве тест-организма при биотестировании использовали односуточные науплиусы артемий. Исследования проводились на морской искусственной воде [4]. Совместное влияние температуры среды и времени экспозиции оценивали в диапазонах 20, 23 и 26 °С и 48, 72, 96 часов, соответственно. Солёность среды составляла 10, 20 и 33‰. Острое токсическое действие бихромата калия ($K_2Cr_2O_7$) определяли в ряду концентраций 0, 2, 4, 8, 16, 32 мг/дм³. Критерием острой токсичности служила гибель 50% и более тест-организмов, при условии, что в контроле смертность не превышала 10%.

Эксперименты проводили в специальных флаконах объемом 50 см³, входящих в комплект устройства экспонирования рачков УБ-01. В каждый флакон с 25 см³ исследуемой пробы помещались по 5 науплиусов в 6 параллелях. Далее УБ-01 устанавливался в климатостат ВЗ, который обеспечивал необходимые температурные условия, постоянное освещение 1200-1500 люкс. Благодаря умеренному вращению кассеты с пробами (12-14 об/мин) в УБ-01 создавались равные световые и температурные условия для всех вариантов опыта и непрерывный газообмен с окружающей воздушной средой. Все используемые приборы разработаны в Сибирском федеральном университете.

Результаты исследования показали, что токсическое действие бихромата калия при повышении температуры среды усиливается. При этом с ростом температуры выживаемость рачков в контрольном варианте опытов при длительных экспозициях снижается. С учетом этих обстоятельств

установлено, что при проведении опытов при температуре 26 °С и времени экспозиции 48 часов токсикологическое воздействие бихромата калия соответствует таковому при температуре 20 °С и времени экспозиции в 72 часа [4].

Таким образом, совместное действие температуры и времени экспозиции проявляется во взаимозаменяемости этих факторов при выполнении токсикологического эксперимента на рачках артемий, что позволяет сократить его длительность с 72 до 48 часов.

Участие в конференции осуществлено при поддержке КГАУ "Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности" в рамках проекта № 2023022009331.

Список литературы

- 1) Libralato G., Prato E., Migliore L., Cicero A.M., Manfra L. A review of toxicity testing protocols and endpoints with *Artemia* spp // *Ecological Indicators*. 2016. Vol. 69. P. 35-49. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.04.017
- 2) Yin Lu, Jie Yu. A well-established method for the rapid assessment of toxicity using *Artemia* spp. model // *Assessment and Management of Radioactive and Electronic Wastes*. 2019. P. 13-21. doi: 10.5772/intechopen.85730
- 3) Manfra L., Savorelli F., Di Lorenzo B., and et al. Intercalibration of ecotoxicity testing protocols with *Artemia franciscana* // *Ecological Indicators*. 2015. Vol. 57. P. 41-47. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.04.021
- 4) ГОСТ Р 53886-2010. Вода. Методы определения токсичности по выживаемости морских ракообразных. – Введена 2012-01-01. – М. : Стандартформ. – 2012. – 50 с.
- 5) ФР 1.1.39.2006.02505 ПНД Ф Т 14.1:2.14-06 16.1:3.11-06 Методика определения токсичности высокоминерализованных поверхностных и сточных вод, почв и отходов по выживаемости солоноватоводных рачков *Artemia salina* L.
- 6) Григорьев Ю.С., Шашкова Т.Л., Стравинскене Е.С., Артына Н.К., Карпов М.В. Оперативные методы биотестирования токсичности пресных и высокоминерализованных водных сред. В сб. материалов III междунар. конф. «Биомониторинг Арктики» – Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. – Архангельск. – 2022. – С. 33-36.

МОРСКОЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ В ЗАЛИВЕ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Ахмаева Э.Э.

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: морское пространственное планирование, информационные технологии, рациональное природопользование, экологическая безопасность.

Россия – великая морская держава, обладающая значительным природно-ресурсным потенциалом. Деятельность человека в прибрежно-морской зоне реализуется неравномерно в разных акваториях, что приводит к возникновению конфликтов и нерациональному использованию природных морских ресурсов [1]. Решить эти и многие другие возникающие проблемы на данном этапе развития действующего законодательства и научных исследований не представляется возможным. Концепция морского пространственного планирования, широко развитая во многих странах мира, могла бы сбалансировать развития прибрежно-морской зоны и оптимизировать морское природопользование.

Реализация морского пространственного планирования в России сталкивается с рядом ограничений, наиболее значимым из которых является нормативно-правовая база. Но это не помешало исследователям разработать концепцию морского пространственного планирования для акваторий Балтийского и Баренцево морей [2, 3]. Что касается акваторий Дальнего Востока, которые не менее ценны с ресурсной и экологической точки зрения, то прикладные научных исследования не проводились. Это делает данную работу актуальной.

В 2022 году Тихоокеанским институтом географии ДВО РАН по заказу консалтингового бюро «Стрелка» было разработано дробное функциональное зонирование территории Владивостокской агломерации для целей устойчивого природопользования. В основу работы были заложены базовые принципы функционального зонирования, среди которых можно выделить сохранение экологических ценностей, обеспечение устойчивого функционирования экологического каркаса. В результате проведенной научно-исследовательской работы, прибрежная территория Владивостокской агломерации была разделена на три основные зоны: изъятие, сохранение, развитие. По данным зонам разделены наземная и морская части, города и городские округа.

Залив Петра Великого – наиболее освоенная акватория российской части Японского моря. Интенсивная эксплуатация обуславливает необходимость комплексного изучения морской среды залива Петра Великого. Благодаря своим географическим и экосистем характеристикам, в заливе сложились следующие основные направления природопользования: судоходство, пассажирские (паромные) перевозки, рыбопромысловая деятельность, портовая деятельность, природоохранная деятельность, рекреация. Эти направления природопользования в данном исследовании выступают базовыми слоями для создания морского пространственного плана, который является иллюстрированным отображением существующих в акватории морских природопользователей, их местоположения, взаимосвязи. Он является графическим отображением (геоинформационной основой) морского пространственного планирования. Работа над морским пространственным планом для акватории залива Петра Великого проводилась в программном обеспечении ESRI ArcGis 10.4. Рассматриваемая акватория от границы с Китаем на западе до бухты Киевка на востоке, от береговой линии Приморского края на севере, до континентального склона залива на юге.

Особое географическое и экономическое положение залива способствует возникновению конфликтов между различными морскими природопользователями. Причин возникновения конфликтов в акватории несколько. Определяющими являются «пространственная теснота», несовместимость отдельных видов морской хозяйственной деятельности и отсутствие межведомственного органа управления на региональном уровне.

Для анализа потенциальных очагов конфликтов в данной акватории была использована картографическая основа Морского пространственного плана. С помощью инструментов Spatial Analyst пакета программ ArcGIS был проведен GRID-анализ. Результатом расчета GRID-анализа является картосхема потенциальных очагов конфликтов в заливе, представленная на слайде. Отчетливо видно примерно пять потенциально конфликтных территорий. Ожидаемо, что южное побережье полуострова Муравьева-Амурского, а также архипелаг островов императрицы Евгении (в него входят острова Русский, Рейнеке, Попова, Рикорда и Шкота) являются самыми потенциально конфликтными из-за «пространственной тесноты», иными словами, большое количество различных направлений морского природопользования сосредоточено в данной части акватории. Также стоит обратить внимание, что участок акватории от западной границы острова Русский до бухты Троицы, который является чуть менее конфликтным. Особый вес конфликтности данной территории придает Морской государственный заповедник, расположенный как раз в этой части залива. Благодаря полученной картосхеме конфликтности можно проследить следующую закономерность: чем дальше от населенных пунктов и судоходных путей, тем ниже уровень конфликтности акватории.

В дальнейшем развитие морского пространственного планирования в акватории залива Петра Великого может пойти по пути развития зонирования акватории для нужд природопользователей или по экономико-экологическим показателям, создания атласа карт. Также считается возможным проведение подсчета морских экосистемных слуг залива и адаптация целей Устойчивого развития (в частности цели №14 «Сохранение морских экосистем»).

У концепции морского пространственного планирования в акватории залива Петра Великого большой потенциал развития. Оно будет способствовать устойчивому развитию акватории и морского природопользования. Как известно, развитие акваторий происходит непрерывно с развитием территорий, к чему так стремится Россия и, в частности, Дальний Восток.

Список литературы

- 1) Блиновская, Я. Ю. Ограничения и сложности реализации морского пространственного планирования в России / Я. Ю. Блиновская // Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ : Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета, Санкт-Петербург, 22–24 октября 2020 года. – Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2020. С. 70-71. EDN UZEGYD.
- 2) Денисов, В. В. Актуальные проблемы управления морским природопользованием (на примере Баренцева моря) / В. В. Денисов, Ю. Г. Михайличенко // Региональная экология. № 3(49). 2017. С. 5-16. EDN ZWTLAR.
- 3) Загнухин, Т. В. Использование принципов экологического каркаса в морском пространственном планировании Балтийского моря // Наука и бизнес: пути развития. № 9(75). 2017. С. 26-33. EDN ZOFRNZ.

СОДЕРЖАНИЕ ХЛОРОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ОРГАНАХ ТУПИКА-НОСОРОГА (*CERORHINCA MONOCERATA*) БУХТЫ БОЙСМАНА (ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

Беланов М.А.¹, Щелканов М.Ю.^{1,2,3,4}, Панкратов Д.В.², Боярова М.Д.¹, Цыганков В.Ю.¹

¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

²Научно-исследовательский институт эпидемиологии и микробиологии
им. Г.П. Сомова Роспотребнадзора, г. Владивосток

³Федеральный научный центр биологического разнообразия наземной биоты
Восточной Азии ДВО РАН г. Владивосток

⁴Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: хлорорганические пестициды, полихлорированные бифенилы, морские птицы, Японское море.

Химические вещества, такие как стойкие органические загрязнители (СОЗ), способны перемещаться на большие расстояния посредством атмосферных и океанических процессов, что приводит к загрязнению экосистем, удаленных от мест их использования. Такие ксенобиотики обладают сильными токсическими свойствами, способностью к биоаккумуляции и, кроме того, крайне медленно распадаются в окружающей среде [3].

Глобальное сокращение популяций многих видов птиц имеет различные причины, в том числе потерю среды обитания, изменение климата и загрязнение окружающей среды. Органические токсиканты не только оказывают долгосрочное воздействие на экосистемы, но и накапливаются в различных видах птиц [4]. Наглядный пример исследования пестицида, воздействующего на птиц, показал, что метаболит дихлордифенилтрихлорэтана (ДДТ), дихлордифенилдихлорэтилен (ДДЕ), стал причиной истончения яичной скорлупы, что оказало большое влияние на размножение и успех вылупления [3]. По этой причине многие СОЗ, включая хлорорганические пестициды (ХОП) и полихлорированные бифенилы (ПХБ), были запрещены или ограничены в использовании и производстве в большинстве стран с начала 1970-х гг.

Морские птицы являются эффективными индикаторами загрязнения морской среды, поскольку они объединяют воздействие загрязняющих веществ во времени и пространстве, а разные виды позволяют проводить выборки из различных мест обитания, от прибрежных до морских. Скопления в гнездовых колониях позволяет исследователям брать пробы возвращающихся взрослых особей путем сбора яиц, крови, перьев или других тканей [3].

Содержание стойких органических загрязняющих веществ в морских птицах дальневосточных морей России изучено фрагментарно [4].

13 июля 2021 г. на побережье Японского моря на юге Хасанского района Приморского края зафиксирована массовая гибель особей тупика-носорога (*Cerorhinca monocerata* (Pallas, 1811)). Позже будет установлено, что причиной гибели птиц явился инфекционный перитонит с синдромом эндогенной интоксикации и полиорганной недостаточностью, вызванный комплексом патогенных микроорганизмов: энтеропатогенными вариантами *E. coli*, *P. vulgaris*, *P. mirabilis*, *P. pennery*, *En. faecalis* и *W. anomalous* (*Candia pelliculosa*) [1]. До этого одной из версий гибели птиц являлось токсическое отравление. В связи с этим было решено проверить эту версию. Цель настоящего исследования - представить данные о содержании хлорорганических пестицидов (изомеров гексахлорциклогексана (ГХЦГ), ДДТ и его метаболитов) и полихлорированных бифенилов в органах тупика-носорога бухты Бойсмана Японского моря.

На содержание ХОП и ПХБ исследовались грудные мышцы, перьевой покров и печень мертвых особей тупика-носорога (n=5), собранных в июле 2021 г. с побережья бухты Бойсмана. Пробоподготовку биологического материала осуществляли по стандартной методике [5]. Определение

содержания органических токсикантов в биоматериале проводили на газовом хромато-масс-спектрометре Shimadzu GC MS-QP 2010 Ultra. Среди СОЗ в образцах определяли: p,p'-ДДТ, o,p'-ДДТ, p,p'-дихлордифенилдихлорэтан (ДДД), o,p'-ДДД, p,p'-ДДЕ, o,p'-ДДЕ, α -, β -, γ -, δ -ГХЦГ и конгенеры ПХБ-28, -52, -101, -118, -153, -138, -180.

Стойкие органические загрязнители обнаружены во всех исследованных пробах тушика-носорога. Содержание Σ СОЗ (Σ ХОП + Σ ПХБ) в различных органах варьировало от 448,5 до 19929,2 нг/г липидов. В перьях диапазон составил от 1326,3 до 4970,5, в грудных мышцах - от 448,5 до 15822,8, в печени - от 491,6 до 19929,2 нг/г липидов.

Хлорорганические пестициды обнаружены во всех образцах тушика-носорога. Уровни Σ ХОП (Σ ГХЦГ + Σ ДДТ) лежали в диапазоне от 29,6 до 1826,5 нг/г липидов. В перьях диапазон составил от 214,1 до 760,5, в грудных мышцах - от 32,4 до 779,2, в печени - от 125,3 до 1826,5 нг/г липидов.

Наиболее встречаемыми изомерами ГХЦГ в органах были β - (80%) и γ -ГХЦГ (73%). При этом β -изомер обнаружен во всех пробах перьевого материала и печени. δ -форма ГХЦГ определена исключительно в перьевом материале, встречаемость которого составила 80%. α -ГХЦГ ниже пределов обнаружения во всех исследованных пробах. Среди метаболитов ДДТ, наиболее часто определяемым в органах, стал ДДЕ. p,p'-ДДЕ отмечен во всех исследованных пробах, а встречаемости o,p'-ДДЕ составила 87%, при этом в печени эти метаболиты обнаружены во всех пробах.

Полихлорированное бифенилы обнаружены во всех пробах. Уровни Σ ПХБ варьировались от 418,9 до 18102,7 нг/г липидов. Определены все исследуемые конгенеры ПХБ. Стоит отметить преобладание высокохлорированных конгенов (ПХБ-118, -153, -138 и -180,) над низкохлорированными (ПХБ-28, -52, 101). Высокохлорированные ПХБ, отличаются большей стойкостью и временем полувыведения, что связано с их высокой растворимостью в липидах [3].

Для оценки времени пребывания органических ксенобиотиков в экосистеме используется отношения концентраций ДДТ и продукта его деградации ДДЕ и отношение концентраций α - и β -форм к γ -изомеру ГХЦГ. Таким образом, преобладание β -ГХЦГ и ДДЕ свидетельствует о длительном пребывании органических токсикантов в экосистеме и отсутствия свежего поступления.

Полученные уровни СОЗ тушика-носорога в Японском море схожи с морскими птицами других регионов Мирового океана [2, 4]. Это указывает на существование глобального фона СОЗ и циркуляцию органических токсикантов в морских экосистемах.

Список литературы

- 1) Дунаева М.Н., Панкратов М.В., Суровый А.Л., Цыганков В.Ю., Беланов М.А., Фоменко П.В., Щелканов М.Ю. Выявление причин эпизоотической вспышки, вызвавшей массовую гибель тушиков-носорогов на побережье Японского моря в южной части Приморского края (июль 2021 г.) // Acta Biomedica Scientifica (East Siberian Biomedical Journal) 7(3). 2022. С. 90–97.
- 2) Kunisue T., Watanabe M., Subramanian A., et al. Accumulation features of persistent organochlorines in resident and migratory birds from Asia // Environ Pollut. 125 (2). 2003. P. 157–172.
- 3) Tanabe S., Subramanian A. Bioindicators of POPs: monitoring in developing countries // Kyoto, Japan: Kyoto University Press; Melbourne: Trans Pacific Press, 2006. 190 p.
- 4) Tsygankov V.Y., Lukyanova O.N., Boyarova M.D. Organochlorine pesticide accumulation in seabirds and marine mammals from the Northwest Pacific // Marine Pollution Bulletin. №128. 2018. P. 208–213.
- 5) Tsygankov V.Yu., Boyarova M.D. Sample preparation method for the determination of organochlorine pesticides in aquatic organisms by gas chromatography // Achievements in the Life Sciences 9. 2015. P. 65–68.

ИХТИОФАУНА КАРКИНИТСКОГО ЗАЛИВА ЧЕРНОГО МОРЯ И ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

Белогурова Р.Е., Карпова Е.П.

Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: Каркинитский залив, Черное море, ихтиофауна, долговременные изменения, Северо-Крымский канал.

Прибрежные морские экосистемы играют важную роль: они высокопродуктивны, характеризуются высоким биоразнообразием; являются местом нагула и нереста многих видов рыб. Вместе с этим, прибрежные морские экосистемы находятся под усиливающимся антропогенным воздействием. В Чёрном море, как в обособленном водоеме Мирового океана, последствия антропогенного пресса в большей мере ощутимы. Антропогенные воздействия в Каркинитском заливе Чёрного моря уникальны по своим масштабам. До 2014 года экосистема восточной части залива находилась под опресняющим воздействием Северо-Крымского канала (СКК). Функционирование, а затем прекращение его работы в Крыму привело к коренным перестройкам ихтиофауны данной акватории [1]. Развитое в Каркинитском заливе браконьерство послужило одной из причин практически полного исчезновения осетровых Acipenseridae. Масштабный промысел травяной креветки *Palaemon adspersus* Rathke, 1837, который ведется в зарослях морских трав залива, ежегодно наносит урон молодежи промысловых рыб и охраняемым видам [2].

Учитывая недостаточную изученность ихтиофауны Каркинитского залива, а также кардинальные изменения его гидрохимических условий, повлекшие за собой перестройки в составе ихтиофауны, актуальность приобретает уточнение ее современного состава.

Материалом для работы являются пробы рыб, полученные в экспедиционных исследованиях ФИЦ ИнБЮМ в Каркинитском заливе Черного моря (северо-западная часть Крымского полуострова, Раздольненский район). Исследования проводили с 2008 по 2018 гг. на 35 станциях. Сбор проб осуществляли с помощью креветочных вентерей с диаметром ячеи 6,5-8,0 мм, ручными сачками с диаметром ячеи 2-5 мм, жаберными сетями с диаметром ячеи от 12 до 22 мм в 2016 и 2017 гг.

Современная ихтиофауна Каркинитского залива представлена 99 видами рыб, из которых в уловах встречаются 80 видов. Основу таксономического разнообразия составляет семейство бычковых Gobiidae (16 видов); семейство карповых Cyprinidae представлено 8 видами рыб, игловых Syngnathidae – 7 видами. По 6 видов насчитывают семейства губановые Labridae и собачковые Blenniidae, семейство сельдевые представлено 5 видами. Семейства кефалевых Mugilidae и присосковых Gobiesocidae представлены 4 видами, осетровые Acipenseridae и скумбриевые Scombridae – 3. По 2 вида рыб отмечено для семейств атериновые Atherinidae, колюшковые Gasterosteidae, спаровые Sparidae и горбылевые Sciaenidae. Остальные 29 семейств насчитывают по одному виду.

Динамика состава ихтиофауны Каркинитского залива наиболее полно прослеживается на примере процессов, происходящих в его восточной части. Проанализирован видовой состав сообществ рыб двух временных периодов: первый период (2008–2014 гг.) – активный сброс пресной воды из СКК в кутовую часть залива, второй (2015–2018 гг.) – прекращение функционирования СКК в Крыму.

Изменения ихтиофауны четко прослеживаются при сравнении доли видов в уловах. В Чартырьском заливе до 2014 г. по численности и биомассе преобладали бычковые (кругляк *Neogobius melanostomus* (Pallas, 1814) и песочник *Neogobius fluviatilis* (Pallas, 1814)). Также здесь регистрировали карповых рыб (серебряный карась и укляя). Разнообразны по видовому составу, но малочисленны и другие представители данного семейства (плотва, горчак, красноперка), а также

солнечный окунь из семейства центрарховых. В заливе Самарчик по биомассе преобладал серебряный карась (более 50%). После прекращения функционирования СКК в Крыму в указанных заливах исчезли представители пресноводной ихтиофауны, но еще высока доля солоноватоводных бычков (песочника и кругляка). Таким образом, состав ихтиофауны восточной части Каркинитского залива в период 2008–2014 гг. в целом оставался довольно стабильным и характеризовался лишь некоторыми пространственными изменениями, а также относительной численностью различных видов в уловах. После 2015 г. структура сообществ рыб восточной части Каркинитского залива заметно изменилась в связи с преобразованием гидрохимического режима.

В Каркинитском заливе обширные площади дна в прибрежной зоне занимают заросли морских трав, где происходит активный нерест, рост и нагул различных видов рыб. Наиболее полная динамика разнообразия сообществ рыб биоценоза морских трав восточной части Каркинитского залива прослежена для Бакальской бухты. В 2015–2018 гг. доля бычка-травяника достоверно ($U=53,0$ при уровне значимости $p<0,05$, $N_1=20$, $N_2=17$) увеличилась с 9,57% до 33,01% по численности и с 20,54% до 50% по массе по сравнению уловами 2012–2014 гг. При этом в 2015–2018 гг. доля черноморской атерины *Atherina boyeri pontica* (Eichwald, 1831) снизилась. Также отмечено значимое на уровне $p<0,05$ увеличение доли чёрного бычка *Gobius niger* Linnaeus, 1758 – с 5,16% до 7,71% по численности ($U=28,5$, $N_1=13$, $N_2=12$). Статистически достоверно снижение доли понто-каспийских бычков: кругляка ($U=29,5$ при уровне значимости $p < 0,05$, $N_1=19$, $N_2=17$) и трубконосого *Proterorhinus marmoratus* (Pallas, 1814). Среди прочих видов рыб отмечен рост в уловах представителей морского фаунистического комплекса – черноморской ставриды и султанки *Mullus barbatus ponticus* Essipov, 1927.

Таким образом, ихтиофауна Каркинитского залива среди прочих акваторий прибрежной зоны Крымского полуострова отличается довольно высоким видовым составом – здесь в целом отмечено 99 видов рыб из 42 семейств. В настоящее время здесь происходит коренная перестройка исторически сложившихся экосистем и идет процесс становления специфических ихтиоценов; их видовая и экологическая структура нестабильна и в основном зависит от деятельности человека.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Фундаментальные исследования популяционной биологии морских животных, их морфологического и генетического разнообразия» (№ 121040500247-0).

Список литературы

- 1) Карпова Е. П., Болтачев А. Р., Аблязов Э. Р., Прищепа Р. Е. Сообщества рыб Каркинитского залива // Морские биологические исследования: достижения и перспективы : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, приуроченной к 145-летию Севастопольской биологической станции : в 3 т. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика. Т. 2. 2016. С. 86–89.
- 2) Болтачев А. Р., Статкевич С. В., Карпова Е. П., Хуторенко И. В. Черноморская травяная креветка *Palaemon adspersus* (Decapoda, Palaemonidae): биология, промысел, проблемы // Вопросы рыболовства. Т. 18. № 3. 2017. С. 313–327.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПЕРЕНОС МИКРОПЛАСТИКА В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ

Березина А.В.^{1,2}, Якушев Е.В.^{1,2,3}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Норвежский Институт Водных Исследований (NIVA), г. Осло, Норвегия

³Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: микропластик, биогеохимические процессы, Северный Ледовитый океан, численное моделирование, ROMS.

Микропластиком (МП) называют фрагменты пластика размером менее 5 мм [1], в качестве нижней границы разными исследователями принимается величина от 1 до 100 мкм. В настоящее время все природные среды, в том числе Мировой океан, подвержены загрязнению МП от полюсов до экватора [2,3].

В работе проверяется гипотеза, что сезонность в продукции-деструкции органического вещества и соответствующие изменения в морской экосистеме могут влиять на вертикальный транспорт МП в водной толще (посредством изменения плотности за счет биообращения и при поглощении и экскреции частиц МП зоопланктоном). Для этого была специально разработана модель трансформации МП под влиянием экосистемных процессов BioPlast. Она воспроизводит основные процессы взаимодействия МП с компонентами морской экосистемы и может быть использована совместно с широким кругом биогеохимических и транспортных моделей, благодаря совместимости с платформой FABM.

BioPlast был применен в связке с биогеохимической моделью OxyDep и двухмерной транспортной моделью 2DBP для акватории Осло-фьорда и трехмерной моделью ROMS с горизонтальным разрешением 20 км для оценки распространения МП в Северном Ледовитом Океане (СЛО).

На примере Осло-фьорда было показано, что в летний период под влиянием экосистемных процессов усиливается перенос МП из поверхностного слоя на дно. Главную роль при этом играет биообращение, которое происходит наиболее интенсивно во время цветения фитопланктона.

В СЛО было исследование распространения МП из рек, впадающих в Белое, Баренцево, Карское и Восточно-Сибирское моря, а также из северной части Атлантического океана, в отсутствие других источников. Было показано, что за 8 лет МП распространяется по всему СЛО, за исключением Канадского бассейна. По разным сценариям, МП Атлантического происхождения доминирует в западной части Евразийского сектора СЛО; по «верхней» оценке, МП из Северной Атлантики занимает практически всю акваторию СЛО. При этом концентрации МП, покрытого биопленкой, МП в зоопланктоне и МП в детрите не велики по сравнению со свободной формой МП. Только в локальных акваториях (в приустьевых зонах, в проливе Фрама) наблюдается кратковременное очищение поверхностного слоя от МП из-за биообращения и седиментации с детритом. Это объясняется частично низкой продуктивностью рассматриваемой акватории и коротким периодом цветения фитопланктона, частично несовершенством и ограничениями модели BioPlast, поскольку, на данный момент, учитывается только ограниченное число компонентов экосистемы, которые взаимодействуют с МП. Кроме того, модельные параметризации и коэффициенты в них имеют большую неопределенность, поскольку на текущий момент существует крайне мало экспериментальных оценок и данных натурных наблюдений по скорости протекания процессов взаимодействия частиц МП с биотой. Тогда как образование биопленки изучено достаточно подробно, для более реалистичного и подробного воспроизведения влияния экосистемы на перенос МП недостаточно количественных оценок выедания МП зоопланктоном, его выделения в детрит, гибели организмов из-за нарушения метаболизма в результате поглощения МП. Дальнейшие работы над

моделью также будут посвящены анализу других источников микропластика в Северном Ледовитом океане, таким как поступление МП из Тихого океана через Берингов пролив и локальных источников, связанные с судоходством на Северном Морском Пути.

Разработка описанной модели имеет большое значение, в особенности для Арктического региона, где недоступны регулярные наблюдения за МП и процессами в морском биогеоценозе, а сама экосистема крайне уязвима к внешним воздействиям.

Исходный код модели был опубликован на портале GitHub, что дает возможность другим разработчикам в научном сообществе предлагать дополнения и улучшения и способствует дальнейшему развитию модельного подхода в этой области.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 20-35-90056.

Список литературы

- 1) Andrady A.L. *Plastics and the environment* // New York: John Wiley & Sons, 2003. 762 pp.
- 2) Kershaw P.J. *Marine Plastic Debris and Microplastics Global lessons and research to inspire action and guide policy change* // UNEP. 2016. 192 p.
- 3) Bergmann M., Collard F., Fabres J. et al. *Plastic pollution in the Arctic* // *Nat. Rev. Earth. Environ.* 3(5). 2022. P. 323–337.

ХЛОРИРОВАННЫЕ УГЛЕВОДОРОДЫ В МОЛЛЮСКАХ СЕМЕЙСТВА MYTILIDAE ЗАЛИВА НАХОДКА (ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

Боровкова А.Д., Боярова М.Д., Цыганков В.Ю.

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: стойкие органические загрязняющие вещества, СОЗ, хлорорганические пестициды, ХОП, полихлорированные бифенилы, ПХБ, двустворчатые моллюски, Mytilidae, Японское море.

Среди органических соединений наиболее малоизученными и губительными для живых организмов считаются стойкие органические загрязняющие вещества (СОЗ), с отрицательным воздействием которых связывают негативное влияние на здоровье людей и возникновение различных нарушений в функционировании природных экосистем. К ним относятся хлорорганические пестициды (ХОП), применяемые в сельском хозяйстве и в целях санитарно-эпидемиологического контроля отдельных заболеваний, и полихлорированные бифенилы (ПХБ), выделяющиеся в ходе некоторых производственных процессов и при сгорании [1].

СОЗ обладают сильными токсическими свойствами, крайне медленно разлагаются, характеризуются биоаккумуляцией и являются объектом трансграничного переноса мигрирующими организмами. За счет перемещения водных и воздушных масс токсиканты способны осаждаться на большом расстоянии от источника загрязнения и накапливаться в экосистемах суши, водных экосистемах и жировых тканях живых организмов [2].

На сегодняшний день получено большое количество данных о содержании СОЗ в разных районах Мирового океана [1, 3, 4], однако, прибрежная зона дальневосточных морей России изучена мало. Целью исследования является определение уровней содержания хлорорганических соединений (изомеров ГХЦГ, ДДТ и его метаболитов, ПХБ) в моллюсках семейства Mytilidae зал. Петра Великого (Японское море).

Материал отобран на пяти станциях зал. Находка (бух. Мусатова, бух. Козьмина, м. Козьмина, бух. Находка, м. Красный) летом 2018 года. Массовое содержание хлорорганических соединений в биологических образцах определяли методом газовой хроматографии. Липиды экстрагировали из гомогенатов мягких тканей индивидуальных особей, используя смесь *n*-гексана и ацетона, с последующим разрушением жировых компонентов концентрированной серной кислотой [5]. Полученный экстракт разделяли на полярную и неполярную фазы. Среди ХОП в исследованных образцах определяли α -, β -, γ - и δ -ГХЦГ, 4,4'-ДДТ, 2,4'-ДДТ, 4,4'-ДДД, 2,4'-ДДД, 4,4'-ДДЕ и 2,4'-ДДЕ, среди ПХБ – 28, 52, 101, 118, 153 и 138 конгенеры.

СОЗ обнаружены во всех образцах в пределах от 6,4 нг/г липидов до 2769,7 нг/г липидов. Концентрации ХОП превышали уровни содержания ПХБ. Среди ГХЦГ преобладал β -изомер, что свидетельствует о давнем поступлении поллютантов в среду. Присутствие ДДТ и его метаболитов зафиксировано практически во всех пробах. Основной метаболит – ДДЕ, также указывающий на длительное пребывание токсикантов в акватории. Наиболее высокие концентрации ХОП обнаружены на территории м. Красный (от 7,4 до 2769,7 нг/г липидов). Такие показатели могут быть обусловлены тем, что в зал. Находка, недалеко от м. Красный, впадает река Партизанская, несущая стоки с полей, где ранее активно применялись пестициды для обработки выращиваемых культур. Кроме того, на территорию мыса оказывается высокая антропогенная нагрузка – здесь расположено много зон рекреации для населения.

Среди ПХБ во всех образцах зафиксирован 28 ПХБ (ср. $81,44 \pm 64,96$ нг/г липидов). Присутствие низкохлорированных конгенеров говорит о свежем загрязнении акватории [1]. В одной пробе, отобранной на территории бух. Мусатова, обнаружен высокохлорированный 153 ПХБ в

количестве 11,5 нг/г липидов. Из исследованных районов наибольшие концентрации ПХБ найдены в моллюсках бух. Козьмина в пределах от 68,0 нг/г липидов до 151,2 нг/г (ср. $112,2 \pm 36,17$ нг/г). В 90-е гг. бухта использовалась как пункт разбора морских судов и аэродром для гидросамолетов. Сейчас акватория является конечным пунктом нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан и на ее территории с 2009 г. введен в эксплуатацию нефтеналивной терминал. Кроме того, бухта находится в зоне активного судоходства, так как в пределах бух. Врангеля и бух. Козьмина расположен один из крупнейших портов Приморского края – порт Восточный. Эти факторы обуславливают поступление низкохлорированных ПХБ в акваторию.

Таким образом, полученные данные демонстрируют продолжающееся загрязнение зал. Находка стойкими органическими загрязняющими веществами. На территории Российской Федерации запрещено использование и производство хлорорганических пестицидов, но, до подписания Стокгольмской конвенции в 2002 году, в Приморском крае ХОП применялись в сельском хозяйстве, что объясняет присутствие продуктов распада токсикантов. Поступление в небольших концентрациях форм, свидетельствующих о недавнем загрязнении акватории, может быть обусловлено явлением трансграничного переноса поллютантов водными и воздушными массами с территорий, где пестициды продолжают использоваться в сельскохозяйственных и медицинских целях. Невысокие уровни содержания низкохлорированных ПХБ в мягких тканях моллюсков связаны с невозможностью полного контроля их поступления в среду и утилизации, так как, согласно Стокгольмской конвенции, полихлорированные бифенилы относятся к категории непреднамеренно производимых соединений.

-

Список литературы

- 1) El-Shahawi M.S., Hamzaa A., Bashammakh A.S., Al-Saggaf W.T. An overview on the accumulation, distribution, transformations, toxicity and analytical methods for the monitoring of persistent organic pollutants // *Talanta* 80. 2010. P. 1587–1597.
- 2) Боярова М.Д. Современные уровни содержания хлорорганических пестицидов в водных организмах залива Петра Великого (Японское море) и озера Ханка // Автореферат дис. кан. биол. наук. – Владивосток: Дальневосточный государственный университет, 2008. – 24 с.
- 3) Ikuta T., Nakajima R., Tsuchiya M., Chiba S., Fujikura K. Interdecadal Distribution of Persistent Organic Pollutants in Deep-Sea Chemosynthetic Bivalves // *Front. Marine Sci.* 8. 2021. 751848
- 4) Vieweg I., Hop H., Brey T., Huber S., Ambrose W.G. Jr., Locke W.L. V, Gabrielsen G.W. Persistent organic pollutants in four bivalve species from Svalbard waters // *Environmental Pollution* 161. 2011. P. 134-142.
- 5) Tsygankov V.Yu., Boyarova M.D. Sample Preparation Method for the Determination of Organochlorine Pesticides in Aquatic Organisms by Gas Chromatography // *Achievements in the Life Sciences* 9. 2015. P. 65–68.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЧАСТИЦАМИ МИКРОПЛАСТИКА ЛЬДОВ КУРШСКОГО ЗАЛИВА (БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ) И БУХТЫ НОВИК (ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

Бочерикова И.Ю.^{1,2}, Чубаренко И.П.¹, Лобчук О.И.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

Ключевые слова: микропластик, лед, распределение микропластика.

В последние годы производство пластика превысило 390 миллиона тонн, при этом, согласно имеющимся данным, около 3% произведенной пластмассы попадает в океан [1]. Основываясь на уже имеющихся данных, можно утверждать, что распространение микропластика (МП) в Мировом океане происходит повсеместно, в том числе и в Арктике [2]. Появляется все больше информации о том, что морской лед содержит на несколько порядков больше частиц пластика, чем морская вода [3]. Таким образом, лед может быть временным накопителем и переносчиком пластиковых частиц [4].

На основе натуральных данных проведено два исследования морского льда на наличие в нем частиц микропластика: в бухте Новик в Приморском крае [5] и в Куршском заливе в Калининградской области [6]. Для исследования концентрации МП в бухте Новик было взято 2 керна, в Куршском заливе 5 кернов льда. Все керны брались из однолетнего льда полузакрытых заливов. Когда керн извлекали из ледяного покрова, измеряли его длину (толщину льда), упаковывали в чистые полиэтиленовые пакеты с этикеткой, помещали в пластиковый контейнер и транспортировали в лабораторию для хранения в холодильнике (-18 °С). В лабораторных условиях керны разрезались на фрагменты по 4-5 см толщиной. Куски льда растапливали при комнатной температуре в течение суток. Талую воду проливали через фильтры с помощью прибора вакуумного фильтрования (ПВФ) с тремя воронками. После фильтрации фильтры упаковывали в стерильные чашки Петри и подписывали. Объём талой воды измеряли химическим мерным стаканом с точностью до 10 мл. Фильтры просматривали на стереоскопическом цифровом микроскопе Микромед МС-2-ZOOM Digital с десятикратным увеличением. Рядом с местом обработки устанавливались чашки Петри с чистыми фильтрами. Контроль возможного внешнего загрязнения при работе в лаборатории проводился на каждом этапе обработки проб.

МП (частицы в размерном диапазоне 0.3-5 мм) были обнаружены во всех слоях льда, каких-либо ясных закономерностей распределения не обнаружено. Количество нитей, фрагментов и пленок резко увеличивалось с уменьшением размера частицы. Средняя концентрация частиц МП (0.3-5 мм) во льду бухты Новик составила 204.3 шт/л талой воды, в Куршском заливе - 60.3 шт/л талой воды. Эти концентрации на порядок выше, чем полученные, например, в Арктическом льду Чукотского моря - 11.4 шт/л (0.1-5 мм [4]). Измерение солёности талых и подлёдных вод показало, что льды и воды Куршского залива - практически пресные, в то время как в бухте Новик лёд морской (подлёдные воды имели солёность 34 psu, талые воды керна - 3-9 psu). Морской лёд формируется при интенсивной вертикальной (термической и солёностной) конвекции, в отличие от пресноводного, формирующегося на поверхности устойчиво стратифицированной водной толщи. Хотя теоретически на этом основании можно предполагать, что морской лёд должен быть более загрязнён, чем пресный (как в нашем случае), однако имеющихся данных пока недостаточно, чтобы утверждать это: несмотря на то, что оба залива полузамкнуты и принимают сопоставимый объём сточных вод окружающих поселений, общий уровень загрязнения их акваторий может значительно различаться.

Исследования проводятся при поддержке РФФ, грант № 19-17-00041.

Список литературы

- 1) Jambeck J.R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T.R., Perryman M., Andrady A., Narayan R., Law K.L. Plastic waste inputs from land into the ocean // *Science* Vol. 347. 2015. P. 768–771.
- 2) Kanhai L.D.K., Gardfeldt K., Lyashevskaya O., Hasselov M., Thompson R.C., O'Connor I. Microplastics in sub-surface waters of the Arctic Central Basin // *Mar. Pollut. Bull.* Vol. 130. 2018. P. 8–18.
- 3) Peeken I., Primpke S., Beyer B., Gütermann J., Katlein C., Krumpfen T., Bergmann M., Hehemann L., Gerdt G. Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic // *Nat. Commun.* Vol. 9. 2018. P. 1505.
- 4) Kim S.K., Lee H.J., Kim J.S., Kang S.H., Yang E.J., Cho K.H., Andrady A. Importance of seasonal sea ice in the western Arctic ocean to the Arctic and global microplastic budgets // *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 418. 2021. P. 125971.
- 5) Chubarenko I., Lazaryuk A., Orlova T., Lobchuk O., Raguso C., Zyubin A., Lasagni M., Saliu F. Microplastics in the first-year sea ice of the Novik Bay, Sea of Japan // *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 185. 2022. P. 114236.
- 6) Бочерикова И.Ю., Чубаренко И.П. Содержание микропластика во льду, снеге и подледной воде Куршского залива зимой 2021 г. // *Океанологические исследования*. Т. 50(3). С. 102–117.

ОТДЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО СООБЩЕСТВА ВОД СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

Бударова В.Ю.¹, Тихонова Е.А.², Бурдиян Н.В.², Дорошенко Ю.В.²

¹Астраханский государственный университет им. В. Н. Татищева, г. Астрахань

²Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: Карское море, нефть, бактерии, загрязнение, самоочищение.

Карское море относится к морям Северного Ледовитого океана, на севере граничит с Полярным бассейном, на востоке с морем Лаптевых, а на западе с Баренцевым морем. Средняя глубина моря - 127 м, наибольшая 620 м, большая часть моря располагается в шельфовой зоне. Море почти весь год покрыто льдами местного происхождения. Льдообразование начинается в сентябре. Циркуляция поверхностных вод моря имеет сложный характер. Одной из основных гидрологических структур Карского моря, ярко выраженных в летний период, является поверхностный опресненный слой (ПОС) [1]. В летний период в море сбрасывается около 30% суммарного годового стока рек Оби и Енисея. В результате перемешивания речных вод с морскими, на обширном Обско-Енисейском взморье образуется ПОС, соленость которого составляет 10 – 25 промилле, а толщина: 5–15 м. Дальнейшее распространение ПОС по акватории Карского моря происходит под влиянием ветрового дрейфа и геострофических течений. Около 75 - 80% объема материкового стока, который несет с собой большие концентрации биогенов, приходится на реки Енисей (до 600 км³/год) и Обь (до 450 км³/год). Реки Пясины, Пур, Таз, впадающие в Карское море, поставляют значительно меньший объем вод (около 75 - 90 км³/год), исходя из этого, наибольшие концентрации нитратов и фосфатов характерны для эстуарных участков акватории Карского моря [2]. Для Карского моря в современный период, актуальны основные экологические проблемы Арктического региона, связанные с изменением климата и таянием арктических льдов, и, как следствие, загрязнение вод северных морей стоками нефти и химических соединений, а так же морским транспортом. Численность бактерий является надежным индикатором органического загрязнения водных экосистем, а методы микробной индикации являются удобным инструментом в мониторинговых работах и позволяют оперативно охарактеризовать экологическую ситуацию в прибрежных водах. Микробиологические показатели позволяют охарактеризовать не только качество природных вод, но и биодеградационный потенциал акватории [3].

Целью работы являлось исследование количественных показателей некоторых бактериальных групп планктонного микробоценоза прибрежной акватории северо-восточной части Карского моря. В задачи исследования входило определение численности бактерий, использующих различные органические субстраты – нефть, белки (пептон), углеводы (глюкоза), липиды (растительный жир) в поверхностном и придонном слоях воды.

Материалом для настоящей работы послужили пробы морской воды отобранные в прибрежной акватории северо-восточной части Карского моря, в июле-августе 2022 г. во время 50 рейса НИС «Академик Борис Петров» Микробиологические работы проводили в судовой лаборатории, сразу после взятия образцов воды. Пробы морской воды с поверхностного и придонного горизонта отбирали из батометра в стерильные стеклянные пробирки объемом 21 см³. В исследуемых образцах определяли численность гетеротрофных (ГБ), липолитических (ЛБ), сахаролитических (СБ) и углеводородокисляющих (УОБ) групп бактерий. Определение численности бактерий проводили методом предельных десятикратных разведений с использованием элективных сред [4]. Всего для микробиологического анализа отобрано 15 проб воды с поверхностного горизонта и 11 проб с придонного. При определении численности углеводородокисляющих и липолитических бактерий в качестве единственного источника углерода и энергии в каждую пробирку (1% от объема среды)

вносили стерильные нефть или растительный жир. При приготовлении сред учитывали соленость морской воды. Инкубацию посевов осуществляли при комнатной температуре.

Температура поверхностного слоя воды, в момент отбора проб, колебалась от +1,5 °С до +5 °С, соответственно, придонного слоя: от +2 °С до +4 °С. Концентрация ионов водорода (pH) в поверхностной воде изменялась в диапазоне от 7,67 до 8,20, в придонной воде: от 7,43 до 7,90. Из полученных данных следует, что в отобранных образцах воды по температурному показателю должны преобладать психрофильные, а по водородному показателю ацидотолерантные группы микроорганизмов. Факторами, определяющими численность микроорганизмов в морской воде, являются температура, соленость, доступность кислорода, зависящая от движения или стагнации воды [5, 6]. Неоднократно отмечено, что в условиях арктических температур воды сравнительно высока биохимическая активность гетеротрофных микроорганизмов. Результаты экспедиционных исследований показали, что численность ГБ в поверхностных водах варьировала в широком диапазоне: от 1 до 10⁶ кл./мл, СБ - от 10 до 10⁴ кл./мл, ЛБ от 1 до 100 кл./мл, УОБ от 0 до 10 кл./мл. В придонном слое воды, диапазон численности ГБ колебался от 100 до 10⁵ кл./мл, СБ от 10³ до 10⁵ кл./мл, ЛБ - от 1 до 100 кл./мл, УОБ - от 1 до 10 кл./мл. Отмечено неравномерное распределение исследуемых групп бактерий. Низкая концентрация УОБ свидетельствует об отсутствии свежего загрязнения акватории нефтью.

Экспедиционные работы выполнялись при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках: - плана-программы экспедиционных исследований МГУ им. М.В. Ломоносова по теме: «Особенности четвертичного седиментогенеза, рельефообразования и природной флюидоразгрузки на морском дне в северо-восточной части Карского моря» и «Обучение-через-исследования на Арктическом шельфе»; государственного задания Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» «Дополнительное обеспечение системы образования в области морских наук – подготовка молодого кадрового резерва по научно образовательной программе «Плавающий университет» на основе комплексных исследований морей России и Мирового океана». Государственного задания ИО РАН «Обеспечение проведения научных исследований, а также экспериментальных разработок». Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ: №121031500515-8 «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем».

Список литературы

- 1) Ильин Г.В., Усягина И.С., Касаткина Н.Е. Геоэкологическое состояние среды морей российского сектора Арктики в условиях современных техногенных нагрузок // Вестник Кольского научного центра РАН № 2. 2015. С. 82–93.
- 2) Reynolds R.W., Smith T.M., Liu C. et al. Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature // J. Clim. V. 20 (22). 2017. P.5473–5496.
- 3) Пашкова Т. С. Микробиологическая индикация загрязнения вод природных источников города Ставрополя // Биоразнообразие, биоресурсы, вопросы химии, биотехнологии и здоровье населения Северо-Кавказского региона : материалы V (62-й) ежегодной научно-практической конференции, Ставрополь, 03–21 апреля 2017 года. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет. 2017. С. 342-344.
- 4) Практикум по микробиологии. /Под ред. А. И. Нетрусова. М.: Издательский центр «Академия». 2005. 608 с.
- 5) Матишов Г. Г., Матишов Д. Г., Усягина И. С., Касаткина Н. Е. Многолетняя динамика радиоактивного загрязнения Баренцево-Карского региона (1960–2013 гг.) // Докл. РАН. Т. 458. № 4. 2014. С. 473–479.

- 6) Junge K., Eicken H., Deming J. W. Bacterial activity at -2 to -20°C in Arctic wintertime sea ice
// Appl. Environ. Microbiol. V. 70 (1). 2004. P. 550–557.

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОМУСОРА НА ПОБЕРЕЖЬЯХ ФИНСКОГО ЗАЛИВА И НЕВСКОЙ ГУБЫ

Голубева Е.А., Ершова А.А.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: морской мусор, микромусор, Финский залив, Невская губа, пляж, загрязнение, микропластик.

Морской мусор - это любой стойкий, изготовленный или обработанный твердый материал, который брошен, утилизирован или оставлен в морской и прибрежной среде [1]. Морской мусор состоит из тех предметов, которые человек мог выбросить намеренно или случайно в результате возросшего уровня изготовления синтетических материалов, а также он мог попасть в реки и, затем, в моря и Мировой океан со сточными или ливневыми водами. Под действием внешних факторов природной среды (температура, ультрафиолетовое излучение и др.) крупный мусор может распадаться на более мелкий, так называемый, микромусор.

Одним из наиболее изученных морей в мире по уровню загрязнения морским мусором и микропластиком является Балтийское море и его побережья: здесь исследования проводятся на протяжении последних десяти лет [2]. В городе Санкт-Петербург исследования начались с 2018 года Российским государственным гидрометеорологическим университетом (лабораторией ПластикЛаб).

Мониторинг морского мусора лабораторией ПластикЛаб, РГГМУ проводится уже на протяжении 5 лет в период 2018-2022 гг., в летнее время на 16 пляжах Санкт-Петербурга и Ленинградской области, расположенных в восточной части Финского залива и Невской губы. Выбор пляжей, на которых проводился мониторинг, в разные годы менялся, в связи с постоянно изменяющимся техногенным ландшафтом на береговой линии (намывы, строительство, и т.п.), однако большая часть станций наблюдений остается неизменной.

Исследования ведутся с помощью двух международных методик отбора проб морского мусора на песчаных побережьях: метод Sand Rake («грабли») и метод рамки - Frame-метод. Они предназначены для оценки аккумуляции крупных частиц микромусора (2-5 мм), а также мезомусора (5-25 мм) в верхнем слое песка (30-50 мм) [3]. Оба метода направлены на отбор визуально-различимой фракции микромусора (2-5 мм), но при этом исследуются две функционально различные зоны пляжа [4]. В данной работе анализируются результаты отбора проб «Frame»-методом: просеивание верхнего слоя песка (2-3 см) с помощью сита с ячейкой 2 мм в зоне заплеска на полигонах по 40 м² (отбор проб микромусора проводится в двух квадратах площадью 1 м² внутри полигона). Отобранные частицы микромусора подсчитываются и классифицируются по размеру, форме и типу материала, который характерен для Балтийского моря: пластик, стекло, бумага, металл и прочие материалы для установления источника загрязнения [4].

По результатам исследований были получены среднестатистические характеристики для рядов данных для пятилетнего периода: среднее арифметическое значение ряда (\bar{x}), медиана (Me) ряда, стандартное отклонение (σ), максимальное и минимальное значения. Так, в 2018 г. ($9,91 \pm 6,28$ шт/м²), в 2020 г. ($5,30 \pm 3,46$ шт/м²) и в 2021 г. ($5,44 \pm 4,06$ шт/м²) стандартное отклонение не превышает среднее значение, а в 2019 г. ($14,75 \pm 15,08$ шт/м²) и в 2022 г. ($6,73 \pm 7,49$ шт/м²), наоборот, стандартное отклонение превышает среднее значение, что говорит о сильной изменчивости рядов данных.

В период 2018-2022 гг. среди всех исследованных пляжей больше всего частиц микромусора на квадратный метр в зоне заплеска обнаружено на пляже в самом центре города Санкт-Петербурга на о-ве Декабристов ($55,5$ шт/м²) в 2019 г. и на Канонерском о-ве ($24,3$ шт/м² – пляж справа от ЗСД) в 2022 году. Наименьшее количество частиц микромусора было обнаружено на пляжах в

заказнике Западный Котлин (1 шт/м²) в 2022 году, в Зеленогорске (1 шт/м²) в 2021 году и в городе Ломоносов (1 шт/м²) в 2020 году. В целом характерна значительная вариабельность значений мусора на пляжах, что отражает в первую очередь сложные и постоянно меняющиеся гидродинамические условия в исследуемом водоеме. Накопление мусора на пляжах зависит от многих факторов: ветро-волновое воздействие и частые сгонно-нагонные явления смывают и намывают частицы мусора на пляжи, постоянно меня картину загрязнения. Также ключевыми факторами в загрязнении пляжей играют высокая антропогенная нагрузка и сток р.Нева: в период наблюдений самыми загрязненными участками продолжают оставаться пляжи в центре города рядом с рукавами р.Нева. Так как наблюдения проводятся один раз в год, то связь с изменением стока реки и содержанием мусора на пляжах в центре города не изучалась подробно.

Несмотря на то, что максимальные значения мусора наблюдаются каждый год в разных зонах водоема, в целом Невская губа отличается значительно более высокими концентрациями мусора, чем открытая часть залива. Каждый год на пляжах Невской губы обнаруживается больше частиц мусора, особенно микропластика, чем в открытой части Финского залива. Это может объясняться тем, что пляжи, находящиеся в Невской губе, испытывают сильную антропогенную нагрузку за счёт поступления стоков и бытовых отходов от крупного мегаполиса, а также за счет стока р.Нева, впадающей в Невскую губу.

В 2018 и 2019 гг. в целом количество мусора больше, чем в последующие 3 года. Видна тенденция уменьшения среднего количества мусора на пляжах в зоне заплеска как в Невской губе, так и в открытой части Финского залива в период 2018-2022 гг. Интересно, что если в 2020 г. это могло быть связано с периодом карантинных ограничений, когда в регионе было приостановлено значительное количество предприятий, а также была ограничена мобильность населения, то относительно низкое количество мусора в зоне заплеска в последующие годы - 2021 и 2022 гг. – объяснить сложнее, что требует дальнейшего изучения.

В течение всего периода на всех исследованных пляжах качественный состав мусора в основном представлен пластиком и стеклом, за исключением пляжа в городе Ломоносов в 2018 году, где превалирует мусор из категории «другое» (кусочки строительной штукатурки).

В целом разнообразие видов материалов, из которых состоит мусор Финского залива и Невской губы, велико, но микропластик является основным. Больше всего частиц микропластика было найдено на пляже на о-ве Декабристов в 2019 г. (55,25 шт/м²), меньше всего – в 2019 г. в парке Александрия (0 шт/м²) и в п. Солнечное (0 шт/м²), а также в 2020 г. в п. Большая Ижора (0 шт/м²). В среднем на пляжах Невской губы обнаружено 6,3 шт/м² микропластика и 2,7 шт/м² в открытой части Финского залива.

Список литературы

- 1) Морской мусор [Электронный ресурс] // UNEP : Режим доступа свободный: <https://www.unep.org/ru/issleduyte-temy/okeyanu-i-morya/nasha-deyatelnost/rabota-po-regionalnym-moryam/morskoy-musor>.
- 2) Ершова А.А. Морской мусор и микропластик в Финском заливе. Изучение глобальной экологической проблемы XXI века на региональном уровне // Окружающая среда. №2(24). 2022. С. 28-31.
- 3) Ершова А.А. Мониторинг морского мусора на побережьях лагун / замкнутых заливов / эстуариев рек (Невская губа) // Методическое пособие по производственной практике: Санкт-Петербург. 2018. 5 с.
- 4) Кузьмина А.С., Ершова А.А. Загрязнение микрочастицами морского мусора песчаных побережий восточной части Финского залива Балтийского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. № 2. 2022. С. 86-100.

ВОЗМОЖНОЕ БЛОКИРОВАНИЕ ВОДОЗАБОРОВ Г. КАЛИНИНГРАДА НА РЕКЕ ПРЕГОЛЕ ИНТРУЗИЯМИ ВОД С ПОВЫШЕННОЙ СОЛЁНОСТЬЮ

Двоеглазова Н.В.^{1,2}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

Ключевые слова: натурные данные, эстуарии, водоснабжение, Юго-Восточная Балтика.

Забор воды из р. Преголи составляет большую часть (60,7%) от всего водоснабжения города Калининграда (21,8% - вода системы питьевых водохранилищ и 17,5% - вода артезианских скважин) [3]. Пригодной для забора считается вода с низкой хлорностью (ПДК 350 мг/л = ок. 0,35 psu) [1; 2]. Лимитирующим показателем загрязнённости является органолептический - у воды с повышенной хлорностью появляется привкус [1].

В осенний период активных нагонов солоноватые воды (солёность > 1 г/л) проникают вплоть до водозабора Южной водопроводной станции №2 (ЮВС-2) [4; 5]. Усиление повторяемости и скорости западных ветров, подъём уровня воды и уменьшение речного стока, действуя в совокупности, создают условия для движения воды вверх по реке [4; 5].

Вследствие блокирования водой с повышенной хлорностью водопроводной станции возникают перебои в водоснабжении [5; 3]. При ухудшении качества воды водозабор из реки Преголи прекращается, и водопроводная станция переходит на работу из двух водохранилищ общим объёмом 2,8 млн. м³ [3]. Важно иметь возможность спрогнозировать продолжительность таких периодов, а также оценить способность водохранилищ обеспечить резервное водоснабжение, которым снабжается 60% населения города, что составляет около 300 тыс. чел. от 500 тыс. населения города.

При нормативе потребления одним человеком 0,3 м³/сут. (10 м³/мес.) для обеспечения 300 тыс. чел. необходим объём порядка 100 тыс. м³/сут. (3 млн м³/мес.). Следовательно, обеспечения водоснабжением в периоды перехода на резервные источники (водохранилища объёмом 2,8 млн. м³) достаточно для работы в течение не более чем 28-ми суток (без учета естественной подпитки через атмосферные осадки, подземные воды, а также стока и испарения). Кроме того, следует учитывать, что до 50% от этого запаса воды может содержать взмученные со дна примеси (аварийный водозабор происходит во время ветреной погоды) и быть ненадлежащего качества. Учитывая, что ещё необходим расход воды для предприятий, автономность поддержания водоснабжением сокращается до 5-10 суток.

Первоначальное детальное изучение влияния затока солоноватых вод на блокировку водозабора ЮВС-2 проводилось на рубеже 2000-х [4; 5]. С целью подтвердить, сохранился ли этот эффект, осенью 2022 г. были проведены новые натурные наблюдения по определению фоновых гидрологических условий с периодичностью один раз в две недели. Работы, приуроченные к периоду активных осенних нагонных явлений, были выполнены 11 и 27 октября 2022 г., 14 и 29 ноября 2022 г. и включали данные измерений на 27-ми станциях, расположенных на участке протяжённостью 52 км, от входа в Калининградский залив (г. Балтийск) до расположения водозаборов на реке Преголе выше г. Калининграда. Измерения осуществлялись в режиме вертикальных STD-зондирований с борта маломерного плавсредства после полной его остановки. Также для определения продолжительности затоков ежедневно осуществлялись промеры в режиме стационарных измерений (с 21 октября 2022 по 02 декабря 2022, 08:00 - 10:00 местного времени). Работы проводились с причала на р. Преголе, выдающегося от берега к середине реки (наб. Петра Великого, 7), расположенного между станциями 26 и 27 (8 км от устья). Измерение глубин проводилось относительно текущего уровня моря.

В течение периода измерений воды Калининградского морского канала (от Приморской бухты до устья р. Преголи) были слабо стратифицированы как по температуре, так и по солёности.

Для участка от устья р. Преголи до водозабора ЮВС-2 протяжённостью 17 км характерна наиболее ярко выраженная вертикальная стратификация солёности, что определяет его как зону смешения заливных (рассолённых) и речных (пресных) вод. Полученные измерения позволили определить, что распределение солёности в разные дни имеет схожую структуру и показывает проникновение солоноватых вод вверх по р. Преголе в придонных горизонтах вплоть до конечных станций 30о и 30 (~17 км от устья), расположенных почти на уровне ЮВС-2.

Двадцать девятого ноября 2022 г. было зафиксировано наиболее сильное продвижение солоноватых вод вверх по р. Преголе. На станции 30о, расположенной рядом с водозабором, самые высокие значения солёности (4,1 psu) были зафиксированы в придонном горизонте. На глубине 3,2-3,7 м наблюдался резкое увеличение солёности с 0,3 до 4,1 psu. Это означает, что вода с повышенной хлорностью действительно доходила до водозабора ЮВС-2, но проникновение происходило только у дна (мощность слоя 0,3-0,5 м). Установившийся и продолжающийся в течение недели (с 14-16-го по 29 ноября 2022 г.) восточный-юго-восточный ветер спровоцировал «интрузионный противозаток» (влияние эжекторного эффекта для нижних слоев воды) [5], движущийся вверх по течению реки. На уровне же верхних 2-х метров (где происходит забор воды) солёность/хлорность на момент измерений была в пределах нормы, следовательно, блокирования водозабора не происходило. Низких среднесуточных скоростей ветра (менее 3 м/с в период 22 по 29 ноября 2022 г.) не хватило для вовлечения придонного слоя в перемешивание всей толщи.

Если бы ветер был достаточным для перемешивания нижних придонных слоёв с остальной водной толщей, то вертикальный профиль распределения солёности на станциях 29о и 30о (14-17 км от устья по рукаву Старой Преголи) был бы равномерным, и солёность у поверхности достигала бы 0,7 psu. Т.е. солёность находилась бы в рамках допустимых пределов для водозабора. А вот на станции 28о (10 км от устья) при полном перемешивании солёность составила бы 1,8 psu, что могло составить угрозу водозабору, если бы нагонные воды продвинулись ещё на 7 км вверх по реке.

Полученные в ходе работ данные подтверждают присутствие эффекта проникновения солоноватых вод. Следовательно, угроза блокировки Южной водопроводной станции №2 (г. Калининград) сохраняется и требует построения детальной модели процесса в условиях увеличения количества штормов [6].

Сбор, анализ и интерпретация натуральных данных выполнялись за счет госзадания ИО РАН (тема №FMWE-2021-0012). Также выражается благодарность сотрудникам Северо-Западного бассейнового филиала ФГУП «Росморпорт» и ГП КО «Водоканал», оказавшим поддержку при проведении работ.

Список литературы

- 1) Постановление об утверждении санитарных правил и норм «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». СанПиН 1.2.3685-21. Москва. 2021. С. 1-469
- 2) Качество вод: термины и определения. ГОСТ 27065-86. Москва. Издательство стандартов. 1988. С. 1-11
- 3) Государственное предприятие Калининградской области «Водоканал» (ГП КО «Водоканал») [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vk39.ru/o-vodokanale/vodosnabzhenie/> (Последнее обращение 24.12.2022)
- 4) Чубаренко Б.В., Шкуренко В.И. Особенности гидрологической структуры вод в эстуарии реки Преголи и в точке стоянки НИС «Витязь» // Экологические проблемы Калининградской области и юго-восточной Балтики. Калининград: КГУ. 1999. С.41-47
- 5) Чубаренко Б.В., Шкуренко В.И. Физические механизмы проникновения солёных вод вверх по реке Преголе с учётом влияния рельефа дна // Физические проблемы экологии (экологическая физика) № 7. 2001. С. 80-88

- 6) Стонт Ж.И., Навроцкая С.Е., Чубаренко Б.В. Многолетние тенденции изменчивости гидрометеорологических характеристик в Калининградском регионе // Океанологические исследования № 1. Т. 48. 2020. С. 45–61

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ АКВАТОРИЙ

Дьячковский Р.А.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: экология моря, Финский залив, экологическая благоприятность, уязвимость экосистем, дреджинг, мутность, дистанционное зондирование Земли, ГИС.

Усиливающаяся антропогенная нагрузка, интенсивное хозяйственное освоение прибрежных акваторий создают необходимость всестороннего изучения влияния деятельности человека на природные комплексы береговых территорий для обеспечения их устойчивого развития. Проблема защиты морских и прибрежных экосистем - одна из ключевых глобальных проблем сохранения биоразнообразия. Особое значение для сохранения природного разнообразия имеет защита морских экосистем в зоне прилива и континентального шельфа.

Эта проблема, в частности, достаточно остро стоит для Финского залива Балтийского моря, в том числе – для его восточной, российской части (ВЧФЗ). В данной работе в качестве примера применения метода экологической оценки акватории была выбрана именно ВЧФЗ, однако, разработанный метод может быть перенесён и на другие зоны.

Вопросы деградации и трансформации экосистем Балтийского моря, его частей - Финского залива и Невской губы, играют значительную роль в современной Международной повестке. Так, начиная с 2000 года, они активно обсуждаются в ходе Международного экологического форума «День Балтийского моря». Сегодня всё чаще ставится вопрос о возможности легкого и быстрого анализа текущего экологического состояния объектов прибрежного природопользования. Построение интегральных карт – это один из перспективных методов, позволяющих решить данную задачу. Такой подход ГИС-визуализации информации – это стремление к представлению результатов мониторинга в простой, ясной по смыслу и наглядной форме для последующей разработки таких систем оценки и прогноза, которые способствовали бы упрощению процедур принятия решений без потери их качества [1].

В качестве индикатора для оценки интегральной экологической благоприятности акватории было выбрано увеличение концентрации взвеси различной фракции в водной толще, как одно из основных негативных воздействий на живые компоненты экосистем ВЧФЗ, возникающее в результате реализации многочисленных крупномасштабных дреджинговых проектов, связанных с формированием намывных и насыпных территорий. На различных участках влияние взвеси имеет разную интенсивность.

Основным применяемым в работе методом является ГИС-картографирование и работа с Данными Дистанционного Зондирования Земли (ДДЗЗ) в программном продукте ArcGIS Pro. При составлении картосхем были задействованы данные экспедиционных исследований, выполненных в рамках проекта Get Ready – «Готовимся принять трансграничные вызовы: наращивание потенциала в области устойчивого использования береговых зон» (2014 – 2020).

Схема расчёта интегрального индекса благоприятности включает в себя 5 этапов: 1) определение коэффициентов относительной уязвимости для каждой из групп гидробионтов (на основании экспертной оценки); 2) поиск данных космоснимков на заданный район исследования; 3) визуальное дешифрирование космоснимков с выделением районов техногенного воздействия; 4) расчёт индексов экологической благоприятности для каждой из групп организмов в ГИС-пакете; 5) расчёт интегрального индекса благоприятности (D) и его интерпретация с учётом дешифрирования исходных космоснимков. Значения полученного интегрального индекса находятся в диапазоне [0; 5], где 1 – «наиболее благоприятна» акватория, 5 – «отнюдь не благоприятна».

В ходе проведённой работы был предложен термин «экологическая благоприятность» существования вида (группы видов) на акватории. Под экологической благоприятностью существования вида предлагается понимать степень соответствия участка территории или акватории диапазону интенсивности факторов окружающей среды соответствующему экологическому оптимуму существования организма. Тогда интегральная экологическая благоприятность характеризует зоны наиболее благоприятные по ряду факторов для n -го количества видов (число разнится в зависимости от задачи) [2].

Экологическую благоприятность можно представить как произведение коэффициента относительной уязвимости и некоторой измеренной величины воздействия, выраженной как нормируемая величина. Методы и способы нормировки могут отличаться в зависимости от задачи – основной смысл состоит в том, чтобы была возможность оценить благоприятность существования вида относительно не только действия одного фактора, но и их суммы.

Наблюдения за изменениями показателей индексов для различных групп организмов проводились за 1994, 1997, 1999, 2001, 2005, 2006, 2014, 2018 и 2021 год за июль месяц (приблизительно 15-ое число). Для каждого года было построено 7 индексов:

- ИБАР – Индекс благоприятности акватории для рыб,
- ИБАМ – Индекс благоприятности акватории для мальков и икры рыбы,
- ИБАМЗ – Индекс благоприятности акватории для макрозообентоса,
- ИБАФ – Индекс благоприятности акватории для фитопланктона,
- ИБАЗ – Индекс благоприятности акватории для зоопланктона,
- ИБАМФ – Индекс благоприятности акватории для макрофитов,
- D – Интегральный индекс благоприятности акватории.

В результате построения картосхем было выявлено, что наиболее уязвимым является мелководный район акватории ВЧФЗ, а наименее – глубоководный. Отмечаются локальные пики значений индекса и как следствие падение биоразнообразия в районах наиболее сильной антропогенной нагрузки.

Наблюдается прямая зависимость между ростом значения индексов в зависимости от уровня рекреационной нагрузки на берег. С 2014 года отмечается рост всех индексов, и даже выход части из них за пределы относительно благоприятной среды. Это обусловлено высокими темпами развития техносферы в данный период.

В ходе работы был сделан вывод, что акватория ВЧФЗ может рассматриваться как относительно благоприятная для существования гидробиологических сообществ.

Список литературы

- 1) Шилин М.Б., Погребов В.Б., Лукьянов С.В., Мамаева М.А., Леднова Ю.А. Экологическая уязвимость береговой зоны восточной части Финского залива к дреджингу // Ученые записки РГГМУ № 25. 2012. С. 107–122.
- 2) Дьячковский Р.А., Шилин М.Б. Оценка экологической благоприятности существования гидробиологических сообществ в восточной части Финского залива // Международная научно-практическая конференция «ЭКОЛОГИЧЕСКИ-ДРУЖЕСТВЕННОЕ РАЗВИТИЕ ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН И МОРСКИХ АКВАТОРИЙ» 9-10 декабря 2021 г., Санкт-Петербург (Россия) Парламентский центр МПА СНГ Сборник материалов конференции, 2021. С. 37–38.

ПЕРЕНОС МИКРОПЛАСТИКА РЕКАМИ ЕВРАЗИЙСКОЙ АРКТИКИ

Жданов И.А.¹, Пахомова С.В.^{1,2}, Березина А.В.^{1,2}, Якушев Е.В.^{1,2}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Норвежский институт водных исследований, г. Осло, Норвегия

Ключевые слова: Микропластик, плюмы, реки Евразийской Арктики, Северная Двина, Лена, Обь, Енисей, микропластиковое загрязнения.

Загрязнение микропластиком является современной проблемой для ученых всего мира. С ростом производства пластмасс растет и интерес к изучению этой проблемы. Год за годом появляется все больше исследований пластикового загрязнения мирового океана. При этом Арктика и арктические воды остаются своего рода «белым пятном» на карте мирового океана. Арктика — наименее изученный регион с точки зрения пластикового загрязнения и, в частности, загрязнения микропластиком. В этой работе было проведено исследование устьев, русел и плюмов крупнейших арктических рек с целью изучения потенциального переноса микропластиковых частиц. Работы проводились в период с 2019-2021 гг. в безледный период.

Значительная удаленность и труднодоступность региона с точки зрения пробоотбора не единственная сложность. Дополнительную трудность представляет разнообразие методов отбора проб и анализа. Часто работу разных научных групп в одном регионе невозможно сравнивать из-за разницы в методах [1]. Все работы данного исследования проводились одной научной группой с использованием одних и тех же методов, поэтому данные по разным рекам можно сравнивать между собой. Все пробы были отобраны с корабля или с лодки нейстонной сетью с размером ячеи 300 мкм. Объем отфильтрованной воды контролировали с помощью счетчика течений. Внешнее загрязнение контролировали в соответствии с последними рекомендациями (АМАР) [2]. Пробо-подготовка проводилась в чистой комнате, затем пробы разбирались вручную и все потенциальные частицы пластика идентифицировали на ИК-спектрометре с преобразованием Фурье. Измерялись масса и размеры частиц. На основании полученных данных подсчитывались концентрации.

В данном исследовании рассматривались частицы в размерном диапазоне 0,5-5 мм. Северная Двина исследовалась как река с относительно населенным бассейном (около 1 млн человек). Обь, Енисей и Лена изучались напротив, как реки с низкой антропогенной нагрузкой в своем бассейне. В исследованных реках концентрации варьировались в среднем от 400 до 1350 штук/км². Полученные данные свидетельствуют о том, что концентрация в Северной Двине выше, чем в менее населенных реках Евразийской Арктики. При этом наблюдается снижение концентраций в направлении с запада на восток. Концентрации в исследованных речных системах ниже, чем в связанных с ними морях. Этот факт может свидетельствовать о том, что арктические реки вряд ли являются основным источником загрязнения микропластиком Северного Ледовитого океана напрямую. В исследуемых речных системах наблюдаются более высокие концентрации мезо- и макропластика по сравнению с более солеными водами Баренцева и Карского морей [3]. Этот факт может свидетельствовать о загрязнении Северного Ледовитого океана вторичным микропластиком с речным стоком. Другими словами это косвенное загрязнение микропластиком посредством фрагментации крупного мусора. Следует отметить, что соответствующие концентрации ниже, чем в крупных густонаселенных реках Европы и Азии [4]. Из чего можно сделать вывод, что арктические реки относительно чистые с точки зрения загрязнения микропластиком.

Список литературы

- 1) Li J., Liu H., Chen J.P. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection // Water Res. 137. 2018. P. 362–374.

- 2) Farmen E., Provencher J., Aliani S., Baak J., Bergmann M., Booth A.M., Bourdages M.P.T., Buhl-Mortensen L., Feld L., Gabrielsen G.W. et al. AMAP Litter and Microplastics Monitoring Guidelines // Arctic Monitoring and Assessment Programme: Tromsø, Norway, 2021; p. 257.
- 3) Yakushev E., Gebruk A., Osadchiv A., Pakhomova S., Lusher A., Berezina A., van Bavel B., Vorozheikina E., Chernykh D., Kolbasova G. et al. Microplastics distribution in the Eurasian Arctic is affected by Atlantic waters and Siberian rivers // Commun. Earth Environ. Vol. 2. 2021. P. 1–10.
- 4) Zhdanov I., Lokhov A., Belesov A., Kozhevnikov A., Pakhomova S., Berezina A., Frolova N., Kotova E., Leshchev A., Wang X. et al. Assessment of seasonal variability of input of microplastics from the Northern Dvina River to the Arctic Ocean // Mar. Pollut. Bull. Vol. 175. 2022. P. 113370.

КУЛЬТИВИРОВАНИЕ МИКРОВОДОРОСЛИ *PHAEODACTYLUM TRICORNUTUM* BOHLIN (1897) КАК СПОСОБ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ САХАРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ (МЕЛАССЫ)

Жондарева Я.Д.

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: Микроводоросли, питательная среда, меласса, органическое питание, миксотрофы, диатомеи, *Phaeodactylum tricornutum*, накопительная культура.

Безопасная утилизация отходов сельскохозяйственных предприятий является на сегодняшний день актуальной проблемой, так как сточные воды без надлежащей очистки и обеззараживания приводят к эвтрофикации и заражению водоемов и почв болезнетворными микроорганизмами.

Уже более полувека разрабатывается методология использования фотосинтезирующих микроорганизмов для очистки сточных вод и отходов крупных производств. Широкий спектр применимости микроводорослей складывается из нескольких основных направлений: использование самой биомассы, использование биомассы как сырья для получения каких-либо ценных веществ, а также применение ассимиляционных свойств микроводорослей для мелиорации водной среды.

Диатомовые микроводоросли являются важной частью биоценозов. Они вырабатывают кислород, а также являются началом трофической цепи и ценным сырьем для получения биологически активных веществ. Они содержат в своем составе полиненасыщенные жирные кислоты (40% от общего содержания жирных кислот) и каротиноиды, что предполагает возможность их массового культивирования. Диатомеи содержат фукоксантин, обладающий антиканцерогенными свойствами. Благодаря этим ценным качествам биомасса диатомовых микроводорослей широко применяется в мировой практике в качестве кормовых добавок для двустворчатых моллюсков, мальков рыб и беспозвоночных[1].

Несмотря на то что водоросли, как и все зеленые растения на Земле, являются фотосинтезирующими организмами, многие микроводоросли способны поглощать содержащиеся в среде органические вещества и осуществлять гетеротрофный или фотогетеротрофный типы питания или сочетать их совместно с фотосинтезом, переходя на миксотрофное питание [2].

В мире существует множество крупных производителей сахара и, соответственно, побочной продукции, например мелассы, содержащей более 50% углеводов, но эти отходы зачастую имеют определенную ценность и могут быть использованы в других отраслях народного хозяйства. Однако в настоящее время они недостаточно эффективно используются, а порой приносят значительный вред окружающей среде. Меласса является энергетическим и высоко усваиваемым кормовым сырьем. Содержание сухого вещества в мелассе колеблется от 60 до 80%, а обычно составляет около 65%. Химический состав мелассы представлен растворимыми сахарами (35-45%) (преимущественно, сахарозой, а также в небольшом количестве глюкозой, фруктозой и раффинозой), минеральными веществами (около 10% сырой золы) и небелковыми азотистыми соединениями. Сахариды, содержащиеся в ней, усваиваются более чем на 90% [3]. Поэтому она вполне может найти свое потенциальное применение для выращивания микроорганизмов, в частности микроводорослей.

С учетом вышесказанного актуальной целью становится исследование возможности роста микроводорослей на органоминеральных питательных средах с использованием мелассы в качестве дополнительного органического субстрата для питания клеток.

Объектом исследования был выбран штамм альгологически чистой диатомовой микроводоросли *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin (IBSS-41), полученный из ЦКП «Коллекция гидробионтов Мирового океана» ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ. Культивирование микроводоросли *Ph. tricornutum*

осуществляли на лабораторной установке, состоящей из двух фотобиореакторов плоскопараллельного типа, систем освещения, термостабилизации и газообеспечения [4]. В качестве минеральной среды использовали среду Тренкеншу-Б ($\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$): $\text{NaNO}_3 - 1,2$; $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} - 0,45$; $\text{Na}_2\text{EDTA} - 0,037$; $\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 7 \text{H}_2\text{O} - 0,0265$; $\text{MnCl}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O} - 0,004$; $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O} - 0,0031$; $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4 \text{H}_2\text{O} - 0,0009$; $\text{K}_2\text{Cr}_2(\text{SO}_4) \cdot 24 \text{H}_2\text{O} - 0,0017$, приготовленную на естественной морской воде соленостью 18‰, которая предварительно была пропастеризована в течение трех суток.

Микроводоросль культивировали в накопительном режиме при температуре 20°C до достижения стационарной фазы роста. Аппроксимированием линейной фазы роста была вычислена максимальная продуктивность культуры. Культура достигла 2,1 $\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$ сухого вещества с линейной скоростью роста 0,48 $\text{г}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{сут}^{-1}$. Остановка дальнейшего роста культуры объясняется наступлением углеродного компенсационного пункта фотосинтеза. Затем на 10 и 17-ые сутки в культуральную среду внесли мелассу как дополнительный источник углеродного питания в концентрации 5 $\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$, что привело к увеличению плотности культуры в 2 и 1,5 раза соответственно, составив на 35-е сутки культивирования 5,1 $\text{г}\cdot\text{л}^{-1}$. После внесения в среду органического углерода в эксперименте также был отмечен длительный переходный период к возобновлению роста, и его продолжительность, составляла около 4 суток [5]. Это связано с формированием неких новых метаболических систем при переходе на миксотрофный тип питания фотосинтезирующих клеток диатомовой микроводоросли *Phaeodactylum tricornutum*, в первую очередь, симпорт-систем транспорта органического углерода в клетки микроводорослей. Также это время расходуется на синтез в клетке «белково-переносчиков» для поглощения клеткой органического углерода [6].

Результаты исследования, целью которого являлась оценка ростовых характеристик *Phaeodactylum tricornutum* при накопительном культивировании с использованием мелассы в качестве органического источника углерода и энергии в условиях непрерывного освещения, подчеркивают возможность использования микроводорослей для очистки отходов сахарной промышленности. Такой подход к культивированию микроводорослей позволит решить немаловажную проблему утилизации отходов сахарной промышленности и других сельскохозяйственных предприятий, а также проблемы экологического характера. Данное исследование может послужить основой для создания в сельскохозяйственном производстве безотходных экологически чистых технологий, так как, используя выросшую таким образом биомассу микроводорослей, можно решить еще одну не менее важную биотехнологическую проблему – проблему несбалансированности рационов кормления животных.

Работа выполнена согласно госзадания "Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса" (№ 121030300149-0).

Список литературы

- 1) Владимирова, М. Г. Массовое культивирование микроскопических водорослей: в 3 т. Т. 1. Жизнь растений / М. Г. Владимирова, В. Е. Семенов. – М. : Просвещение, 1977. – С. 367-376.
- 2) Жондарева, Я. Д. Миксотрофный рост *Phaeodactylum tricornutum* на неорганической среде с глюкозой и глицерином в накопительной культуре // Морские биологические исследования: достижения и перспективы: в 3-х т.: сб. материалов. - Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика. Т. 3. 2016. С. 378–382.
- 3) Денщиков, М. Т. Отходы пищевой промышленности и их использование / М. Т. Денщиков. - М. : Пищепромиздат, 1963. - 615 с.
- 4) Тренкеншу, Р. П. Унифицированная установка для лабораторных исследований микроводорослей / Р. П. Тренкеншу [и др.] // Вопросы современной альгологии. - 2017. - № 1 (13).

- 5) Тренкеншу, Р. П., Жондарева, Я. Д. Лаг-период культуры *Phaeodactylum tricorutum* Bohlin при переходе на гетеротрофный тип питания // Вопросы современной альгологии. № 1 (13). 2017.
- 6) Тренкеншу, Р. П., Жондарева, Я. Д. Кинетика симпорта органических форм биогенов у микроводорослей // Морские биологические исследования: достижения и перспективы: в 3-х т.: сб. материалов. - Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика. Т. 3. 2016. С. 452-455.

ЭВТРОФИРОВАНИЕ И КАЧЕСТВО ВОД ПО ХЛОРОФИЛЛУ В РАЙОНЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ КАЛИНИНГРАДСКОГО ПХГ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Калинина Д.А.¹, Александров С.В.²

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Хлорофилл «а», Балтийское море, Калининградское подземное хранилище, трофическое состояние.

Балтийское море находится под интенсивным антропогенным воздействием, прежде всего, в прибрежной зоне. В последние десятилетия в прибрежной зоне Калининградской области значительно увеличилась хозяйственная деятельность: развитие федеральных курортов, строительство портов и терминалов, берегозащитные мероприятия и другое, что серьезно воздействует на среду обитания и связанные с ней экологические процессы. Одним из районов интенсивной хозяйственной деятельности является северное побережье Калининградского полуострова, где в районе поселков Романово и Куликово ведется строительство комплекса объектов Калининградского подземного хранилища газа (ПХГ), включая подземные резервуары и морской терминал по приему газа. Калининградское ПХГ является первым в России хранилищем, созданным в отложениях каменной соли, которое к 2025 гг. должно иметь объем газа 800 млн. м³. Технологической особенностью строительства подземных резервуаров Калининградского ПХГ является регулярный водозабор и последующий сброс в прибрежной морской зоне рассола. Эти и другие виды хозяйственной деятельности могут существенно изменить прибрежную экосистему, включая структуру и обилие бентосных и планктонных сообществ [1]. Хлорофилл «а» - основной пигмент водорослей и определение его концентрации является методом оценки биомассы фитопланктона, индикатором эвтрофирования и качества вод. В работе проанализированы концентрации хлорофилла «а» в воде как показателя трофического уровня и качества вод в прибрежной зоне в районе Калининградского ПХГ.

Влияние сброса рассола на планктонные сообщества исследовалось на полигоне из 12 точек, из которых 4 были размещены по кругу от места расположения объекта водозабора и сброса рассола на глубине 10-12 м. Остальные точки распределялись по 3 трансектам: одна вдоль прибрежной зоны и две мористее на север и северо-восток. Весь полигон размещался на акватории с глубинами 8-19 м. Крайние мористые точки находились в районе терминала по приему газа, где базируется судно «Маршал Василевский» - единственная плавучая регазификационная установка в России, доставляющая газ для Калининградского ПХГ. Исследования выполнялись весной, летом и осенью (26 апреля, 4 июля, 13 октября 2022 г.), что позволило оценить сезонную динамику концентрации хлорофилла «а». Морскую воду для определения хлорофилла отбирали в поверхностном слое (0-1 м), а также в октябре у дна. Пробы отбирали с помощью батометров объемом 0,1-0,5 л и фильтровали через мембранные фильтры «МФАС-МА-6» (диаметр пор 0,3 мкм). Измерения выполнялись спектрофотометрическим методом на спектрофотометре LekiSS2109UV на 4 длинах волн (750, 664, 647, 630 нм.) согласно ГОСТ 17.1.04.02-90.

В весенний период концентрация хлорофилла «а» была в диапазоне 2,1-3,2 мкг/л, составляя в среднем для полигона 2,6 мкг/л. Непосредственно в районе сброса рассола средняя концентрация составляла 2,4 мкг/л. В прибрежной зоне концентрации хлорофилла «а» увеличивались до 3,0-3,2 мкг/л, а на самых мористых точках – 2,1-2,2 мкг/л.

В летний период концентрация хлорофилла «а» соответствовали весеннему уровню, изменяясь в диапазоне от 2,2 до 3,9 мкг/л, составляя в среднем 2,6 мкг/л. В районе сброса рассола средняя

концентрация составляла 2,4 мкг/л и такие же величины были в прибрежной зоне, а на самых мористых точках – 2,2 мкг/л. В летний период отсутствовала пространственная изменчивость концентрации хлорофилла «а».

В осенний период концентрация хлорофилла «а» в поверхностном слое была в диапазоне 1,3-5,5 мкг/л, а у дна – 1,0-3,6 мкг/л, составляя в среднем 2,8 и 2,5 мкг/л. В районе сброса рассола средняя концентрация составляла 2,6 мкг/л, а в прибрежной зоне – 2,9 мкг/л, повышенные величины хлорофилла «а» могли наблюдаться как у поверхности, так и у дна из-за перемешивания всего столба. Особенностью распределения в более мористой и глубоководной зоне (> 15 м) были высокие концентрации хлорофилла «а» (обилия водорослей) в поверхностном слое 1,8-5,8, в среднем 3,5 мкг/л, по сравнению с придонным слоем 1,0-2,8, в среднем 2,0 мкг/л, вероятно, как результат наличия термоклина, отделяющего фотическую зону.

В целом в периоды исследования наблюдалась достаточно сглаженная картина сезонной динамики развития фитопланктона. Интенсивного развития фитопланктона («цветения» воды) периодически, отмечаемого весной при развитии диатомовых и летом при развитии синезеленых водорослей, не отмечено. Однако согласно предыдущим исследованиям уровень развития фитопланктона в прибрежном районе в отдельные годы может сильно различаться. Полученные в 2022 г. величины хлорофилла «а» были характерны для прибрежного района (глубины 0-20 м) российского сектора Гданьского бассейна, в том числе для района сочленения Калининградского полуострова и Куршской косы (в среднем 2,2 мкг/л весной, 3,3 мкг/л летом и 2,8 мкг/л осенью) по данным исследований в 2003-15 гг. [2, 3].

Согласно классификации трофического статуса вод величины хлорофилла «а» (обилия фитопланктона) в районе исследования соответствовали мезотрофному уровню (0,8-4,0 мкг/л) [4], что характерно для Балтийского моря. Согласно классификации качества вод Балтийского моря, величины хлорофилла «а» соответствовали «хорошему» качеству (II класс – 2-4 мкг/л), что характерно для акваторий, на которые не влияет поступление загрязняющих веществ и отсутствует «цветение» водорослей [5].

Полученные в 2022 г. данные в целом соответствуют многолетним закономерностям развития фитопланктона в прибрежном районе калининградского сектора Балтийского моря. Прямого негативного влияния сброса рассола или других видов антропогенного воздействия (функционирование морского терминала и другое) на концентрацию хлорофилла, как показателя эвтрофирования и качества вод, не выявлено. Однако необходимо учитывать кратковременность выполненных работ в пределах одного года и необходимость выполнения регулярных мониторинга в районе Калининградского ПХГ.

Список литературы

- 1) Александров С.В. , Гусев А.А. , Дмитриева О.А. [и др.]. Планктонные и бентосные сообщества Балтийского моря у северного побережья Самбийского полуострова летом и осенью 2017 года // Труды АтлантНИРО. Т.3. № 2(8). 2019. С. 38-58.
- 2) Kudryavtseva E., Bukanova T., Aleksandrov S. [et al.]. Relationship between seasonal variations of primary production, abiotic factors and phytoplankton composition in the coastal zone of the south-eastern part of the Baltic Sea // Regional Studies in Marine Science № 32. 2019. P. 100862.
- 3) Кудрявцева Е.А., Александров С.В. Гидролого-гидрохимические основы первичной продуктивности и районирование Российского сектора Гданьского бассейна Балтийского моря // Океанология № 59(1). 2019. С. 56-71.
- 4) Wasmund, N. et al. Trophic status of the south-eastern Baltic sea: a comparison of coastal and open areas // Estuarine, Coastal and Shelf Science № 53. 2001. P. 849-864.
- 5) Vuoristo H. Water quality classification of Finnish waters // European Water Management №1(6). 1998. P. 35-41.

ПОИСК И ОБНАРУЖЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ В ЧЕРНОМ МОРЕ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ВЕРИФИКАЦИЕЙ

Клименко С.К.

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Черное море, естественные нефтепроявления, космическая радиолокация, спутниковый мониторинг.

Анализируются результаты спутникового мониторинга естественных нефтепроявлений (обусловленных грифонами, сипами и т.п. на морском дне) Керченского предпроливья и их верификации. Для поиска и идентификации пятен пленочных загрязнений нефти и нефтепродуктов, способных образовывать пленки на морской поверхности, использовались радиолокационные изображения (РЛИ) европейских спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B, а также доступные оптические снимки Sentinel-2 и Landsat-8, покрывающие акваторию Керченского пролива и предпроливья Черного моря.

В ходе мониторинга 2017-2022 гг. среди антропогенных пятен пленочных загрязнений было обнаружено 294 пятна естественных нефтепроявлений на 126 РЛИ. Они тяготели к одним и тем же источникам на мелководном черноморском шельфе, формируя характерную пространственно-временную группировку на последовательных разновременных снимках. С помощью геоинформационного (ГИС) подхода путем выявления и анализа кластеров таких пятен были обнаружены три источника нефтепроявлений, по целому ряду признаков предварительно идентифицированных как естественные. С целью верификации одного из них, находящегося к юго-западу от банки Мария Магдалина (северо-восточная часть моря), в августе 2022 г. были проведены экспедиционные исследования, в ходе которых надводные и подводные наблюдения и отбор проб подтвердили природное происхождение нефтепроявлений, впервые обнаруженных на спутниковых изображениях.

Использованный метод показал эффективность применения космической радиолокации и ГИС-подхода для задач поиска и обнаружения естественных нефтепроявлений в российских морях, которые при подспутниковой верификации позволяют точно установить природу обнаруженных нефтепроявлений. Полученные результаты крайне полезны для дальнейшего исследования особенностей геолого-геофизической среды и современной геодинамической активности Керченского предпроливья и даже в Черном море.

Список литературы

- 1) Иванов А.Ю., Хлебников Д.В., Коновалов Б.В., Клименко С.К., Терлеева Н.В. Керченский пролив и его техногенное загрязнение: возможности оптического и радиолокационного дистанционного зондирования // Экология и промышленность России. Т. 25. № 8. 2021. С. 21–27.
- 2) ИО РАН, 2021. Пятилетний мониторинг пленочных загрязнений Керченского пролива <https://ocean.ru/index.php/novosti-left/ob-yavleniya/item/2203-pyatiletnij-monitoring-plenochnykh-zagryaznenij-kerchenskogo-proлива>
- 3) СКАНЭКС, 2021. На шельфе Керченского предпроливья Черного моря обнаружены естественные нефтепроявления <https://www.scanex.ru/company/news/na-shelfe-kerchenskogo-predproliyaya-chernogo-morya-obnaruzheny-estestvennye-nefteproyavleniya/>

- 4) Клименко С.К., Иванов А.Ю., Терлеева Н.В. Пленочные загрязнения Керченского пролива по данным пятилетнего радиолокационного мониторинга: современное состояние и основные источники // Исслед. Земли из космоса. № 3. 2022. С. 37–54.
- 5) ИО РАН, 2016. Признаки усиления грифонной активности в Черном и Каспийском морях по данным дистанционного зондирования <https://ocean.ru/index.php/novosti-left/novosti-instituta/item/1391-priznaki-usileniya-grifonnoj-aktivnosti-v-chernom-i-kaspijskom-moryakh-po-dannym-distantsionnogo-zondirovaniya>

ДАННЫЕ О СОДЕРЖАНИИ МИКРОПЛАСТИКА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ РЕЙСА АНСЗ9

Кривошлык П.Н.^{1,2}, Чубаренко И.П.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Калининград

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

Ключевые слова: загрязнение микропластиком, тип донных отложений, юго-восточная часть Балтийского моря, Финский залив.

В настоящее время микропластик (МП) обнаруживается учеными во всех средах Мирового океана [1, 2], и Балтийское море не является исключением [3]. До конца не изучено, какие именно факторы наиболее важны для накопления МП в донных осадках, где картина загрязнения крайне неоднородна [3]. Это затрудняет проведение мониторинга морской среды и оценку массы пластика в целом, т.к. именно в донных осадках открытого моря наблюдаются максимальные концентрации частиц МП. Так например, в прибойной зоне пляжей Юго-Восточной Балтики содержится от 9 до 258 шт. частиц МП на килограмм сухого веса песка [4, 5], в слое водорослей, покрывающих валуны на подводном склоне – 376 ± 404 шт./кг сух.веса [6], в то время как в глубоководных осадках Готландской впадины среднее по 53 пробам загрязнение составило 863 ± 1371 шт./кг сух.веса при максимальном значении $10\,179$ шт./кг сух.веса [3].

Содержание частиц МП (0,3-5 мм) выявлено на основании анализа 19 проб донных отложений (глубина от 37 до 106 м), полученных в ходе 39 рейса «Академика Николая Стрехова», который проходил по акватории Балтийского моря (Юго-восточная часть и Финский залив) в мае 2019 года.

Осадки обработаны при помощи модифицированного метода Национального управления океанических и атмосферных исследований (НОАА), включающего в себя: 1) промыв осадка на ситах (333, 175 и 100 мкм) с добавлением ярких, легко различимых, контрольных, зеленых, пластиковых, флуоресцирующих частиц; 2) удаление водорослей при помощи пероксида водорода (H₂O₂, 30%) и катализатора при температуре 75°C; 3) отстаивание в соляной кислоте (HCl, 4,5%) для окончательного удаления кальцитной фракции; 4) сепарирование осадка хлористым цинком (плотностью - 1.5г/см³) при помощи воронки или стакана на сита 175, 100 мкм; 5) сушка фильтров в накрытой чашке Петри. После сушки пробы просматривались на микроскопе с увеличением от 10^x до 40^x.

Всего обнаружена 10 421 предполагаемая частица МП. Содержание МП на станциях варьировалось от 222 (ст.6) до 813 (ст.19) частиц в пробе, со средним значением 548 ± 190 штук в образце. Среднее загрязнение образца в лаборатории составило 21 ± 9 ед./образец (только волокна). Исследование не показало взаимосвязи содержания частиц МП с типом донного осадка. Как самые маленькие, так и самые большие концентрации МП обнаружены в илистых осадках. Также на обнаружено зависимости концентрации частиц МП от глубины. По форме, 96,46% частиц МП составили волокна, фрагментов обнаружено 3,5%, самой малочисленной фракцией оказались плёнки, всего 0,04%. Распределение по размерам показало, что большинство частиц имеют длину 0,5-2 мм (69,4%), частиц размером 0,3-0,5 мм обнаружено 16,2%, частиц длиной 2-5 мм обнаружено 12,9%, частиц крупнее 5 мм обнаружено всего 1,6%. Большинство частиц МП оказалось прозрачными 78,1%, синих, зелёных, черных, красных, белых, жёлтых, частиц оказалось соответственно: 7,8%, 5%, 3,3%, 2,5%, 1,5%, 1,4%, самыми малочисленными частицами оказались коричневые частицы, 0,4%.

Таким образом, даже если принять, что синтетическая природа будет подтверждена для 90% частиц (как это было выявлено предыдущими исследованиями для данного оператора), то результирующее загрязнение составит порядка 400 частиц МП (0,3-5 мм), что хорошо соответствует ранее полученным [3] значениям.

Исследование выполнено при поддержке госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2021-0012).

Список литературы

- 1) Turan N. B. et al. Current status of studies on microplastics in the world's marine environments // Journal of Cleaner Production. Vol. 327. 2021. P. 129394.
- 2) Peng X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean // Geochemical Perspectives Letters. Vol. 9(1). 2018. P. 1-5.
- 3) Chubarenko I. et al. Microplastics distribution in bottom sediments of the Baltic Sea Proper // Marine Pollution Bulletin. Vol. 179. 2022. P. 113743.
- 4) Кривошлык П.Н., Чубаренко И.П. Сезонные изменения содержания частиц микропластика в песках прибойной зоны пляжа // Океанологические исследования. Т. 49(2). 2021. С. 57-66.
- 5) Chubarenko I. et al. From macro to micro, from patchy to uniform: Analyzing plastic contamination along and across a sandy tide-less coast // Marine Pollution Bulletin. Vol. 156. 2020. P. 111198.
- 6) Esiukova E.E. et al. Marine macrophytes retain microplastics // Marine Pollution Bulletin. Vol. 171. 2021. P. 112738.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОМЫСЛОВОМ РЫБОЛОВСТВЕ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ

Кузнецов Р.Е., Дроздов В.В.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург.

Ключевые слова: Балтийское море, промысловые виды рыб, промышленное рыболовство, экологическая безопасность.

Согласно федеральному закону «Об охране окружающей среды от 10.01.2002 № 7-ФЗ, экологическая безопасность – это состояние защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от возможного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, их последствий. При этом сохранение водных биоресурсов должно являться частью общей стратегии продовольственной безопасности. Поддержание водных биоресурсов или их восстановление до уровней, при которых могут быть обеспечены максимальная устойчивая добыча (вылов) водных биоресурсов и их биологическое разнообразие, посредством осуществления на основе научных данных мер по изучению, охране, воспроизводству, рациональному использованию водных биоресурсов и охране среды их обитания – важнейшая научная и прикладная задача. Ее решение, возможно только на основе междисциплинарного экосистемного подхода, когда процессы биологической продуктивности конкретных промысловых популяций рассматриваются в неразрывной связи с абиотическими условиями и конкретными факторами, способными оказывать на воспроизводство рыб определяющее значение на разных этапах их жизненного цикла [1].

Целью исследования является оценка причин многолетней динамики показателей урожайности популяций промысловых рыб Балтийского моря на основе анализа изменений климата, океанологических условий, а также величин антропогенного изъятия части популяций промыслом. В последние 30 лет во многих акваториях Мира, в том числе и в Балтийском море, наблюдается снижение запасов некоторых ценных промысловых рыб и величин ежегодно утверждаемых допустимых уловов водных биоресурсов [2]. Как правило, причинами таких ситуаций являются не только антропогенное загрязнение, но и не достаточный учет природной динамики значений факторов среды определяющих успех воспроизводства рыб.

В Балтийском море из обитающих около 110 видов рыб, включая морских, солоновато-водных и пресноводных, промысловым значением обладают 30 видов. Из них 4 вида доминируют в промышленном рыболовстве: треска (*Gadus morhua* L.), сельдь (*Clupea harengus varietas membras* L.), шпрот (*Sprattus sprattus balticus*) и речная камбала (*Platichthys flesus* L.). На суммарный вылов этих рыб приходится около 90 % от общего объема промысла в Балтийском море. (килька). Помимо России рыбные запасы Балтийского моря используются восемью странами региона [2–3].

Комплексный анализ степени и характера влияния климатических колебаний и океанологических факторов морской среды на показатели биопродуктивности промысловой ихтиофауны Балтийского моря позволяет прийти к выводу о наибольшей зависимости популяций донных рыб – трески и камбалообразных от изменчивости природных процессов. Установлено, что рост урожайности и уловов донных балтийских рыб зависит от интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой, которая, в свою очередь, через цепь причинно-следственных связей определяет объемы и длительность поступления североморских вод с повышенной соленостью и содержанием растворенного кислорода в Балтику. Интенсивное поступление североморских вод в 2003, 2014 – 2015 гг. привело к формированию благоприятных абиотических условиях для воспроизводства донных рыб в придонных горизонтах Готландской, Гданьской и Борнхольмской впадин, в частности к росту значений солёности воды, температуры и концентрации растворенного кислорода.

Рост значений солености воды в поверхностном слое Балтийского моря положительно сказывается на воспроизводстве и численности поколений пелагических рыб – прежде всего сельди в центральных и южных акваториях. Возрастание солености воды на поверхности Готландской впадины, а также на поверхности Гданьской и Борнхольмской впадин приводит к выраженному росту значений всех используемых показателей урожайности балтийской сельди – урожайности молоди, биомассы нерестового стада и уловов.

Популяции промысловых рыб в Балтийском море подвергается воздействию также ряда антропогенных факторов. К числу антропогенных, оказывающих наиболее заметное негативное влияние следует отнести – снижение концентрации кислорода на шельфовой зоне в ряде районов в результате последствий эвтрофикации, химическое загрязнение, влияние на кормовую базу, нарушение прибрежных нерестилищ при морской хозяйственной деятельности, внедрение чужеродных видов [4], а также, в некоторые периоды времени – чрезмерная эксплуатация промысловых стад при ведении промышленного рыболовства. Например, в конце 1980-х годов уловы наиболее многочисленной восточно-балтийской популяции трески в центральной части моря достигали 70 % от биомассы нерестового стада [5]. Таким образом, причинами экстремального снижения урожайности и уловов донных рыб в конце 1980-х гг., явились крайне неблагоприятные условия для их размножения, по причине длительного отсутствия мощных поступлений североморских вод в Балтику, на фоне резкого роста антропогенного изъятия промыслом.

В последние годы продолжается тенденция, возникшая с середины 1990-х гг. в отношении падения запасов балтийской трески и речной камбалы, возникшая на фоне чрезмерных объемов промыслового изъятия без должного учета степени благоприятности условий среды для воспроизводства на их нерестилищах. Поэтому, с учетом сложной специфики пространственной и временной изменчивости климатических, океанологических и экологических условий в регионе Балтийского моря, оценке и прогнозу значений факторов среды определяющих успех воспроизводства промысловых рыб на нерестилищах, особенно донных, следует уделять повышенное внимание. Именно таким образом могут быть достигнуты успехи в обеспечении экологической безопасности морских экосистем в регионах с традиционно достаточно развитым промышленным рыболовством.

Список литературы

- 1) Дроздов В.В., Тыркин И.А. Экологическая безопасность промышленного рыболовства // Учебное пособие. Санкт-Петербург: РГГМУ, 2021. – 254 с.
- 2) Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (АтлантНИРО). Официальный сайт. [Электронный ресурс] URL: www.atlant.vniro.ru (дата обращения: 10.10.2022).
- 3) Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии. Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: www.vniro.ru (дата обращения: 12.10.2022).
- 4) Хельсинская комиссия (ХЕЛКОМ). Официальный сайт. [Электронный ресурс] URL: <https://helcom.fi/> (дата обращения: 15.10.2022).
- 5) Состояние морского рыболовства и аквакультуры 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fao.org/3/ca9229ru/online/ca9229ru.html> (дата обращения: 18.10.2022).

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ БАРЕНЦЕВА МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИИ "АРКТИЧЕСКИЙ ПЛАВУЧИЙ УНИВЕРСИТЕТ 2021"

Кузьмина А.С., Ершова А.А.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: микропластик, загрязнение, Баренцево море, Арктика.

Одной из глобальных экологических проблем современности является загрязнение океана антропогенными частицами, в том числе микропластиком (фрагментами размером менее 5 мм). Микропластик может причинять вред здоровью гидробионтов и человека [1]. Источниками микропластика в морской среде являются речной сток, судоходство, рыболовство и бытовые отходы. Полимерные частицы зачастую имеют низкую плотность и, попадая в океан, переносятся течениями в зоны аккумуляции, одной из которых через несколько десятилетий может стать и Баренцево море [2]. Бассейн Баренцева моря является крупным рыбопромысловым районом, поэтому для оценки потенциальной загрязненности рыбных ресурсов микропластиком необходимы данные о содержании полимерных частиц в морской среде. Отсюда следует, что изучение микропластикового загрязнения данной акватории является актуальной задачей. Подобные исследования проводятся уже на протяжении нескольких лет [3], но для изучения динамики содержания микропластика в морской среде следует отбирать пробы регулярно.

В июне-июле 2021 года в рамках программы «Арктический плавучий университет 2021» (АПУ-2021), проводились исследования количественного и качественного состава микропластиковых частиц в акватории Белого и Баренцева морей. В ходе экспедиции было отобрано 11 проб воды в Белом море и восточной части Баренцева моря с поверхностного горизонта при помощи пробоотборника ПластикЛаб, встроенного в проточную систему и забирающего заборную воду по ходу судна с подповерхностного слоя (до 4 м). Вода профильтровывалась через насадку с метал-лической сетью с размером ячеей 100 мкм (минимальный размер анализируемых частиц), объем профильтрованной воды на одну пробу составлял не менее 1 м³. Далее концентрированная проба консервировалась для последующего лабораторного анализа. Обработка проб в лаборатории состояла из нескольких этапов: очистка проб от органического материала; визуальная идентификация и отбор микропластиковых частиц с помощью светового микроскопа для последующего определения состава частиц методом ИК-Фурье спектроскопии [4]. При этом в каждой пробе группировались повторяющиеся, схожие частицы, и для определения полимерного состава отбиралось по одной из каждой группы, что снизило долю направленных на спектроскопию потенциальных полимерных частиц до 16% от общего количества обнаруженных.

Результаты исследования показали, что среднее содержание микропластиковых частиц в поверхностном слое летом 2021 года – 6,8 (±11,4) шт/м³. Максимальные концентрации частиц – 10,4 и 40,2 шт/м³ – наблюдаются к северу от горла Белого моря. Возможной причиной могло послужить активное судоходство в данной зоне и близкое прохождение судов непосредственно в момент отбора проб. Относительно невысокую концентрацию (4,2 шт/м³), наблюдаемую в Белом море, можно объяснить малыми количествами микропластика, обнаруженными в водах Северной Двины [5], и сравнительно низким объемом речного стока в период пробоотбора. К югу от архипелага Земля Франца-Иосифа локальное повышение концентрации (4,7 шт/м³) может быть следствием сложной схемы течений. В других точках концентрации полимерных частиц в воде были значительно ниже среднего, а минимальное значение наблюдается в северной части Баренцева моря и составляет 0,4 шт/м³. По результатам исследований, проведенных в 2019 году в данном районе [3], наблюдались более высокие концентрации (в среднем 8 шт/м³). Значения концентраций имеют один порядок – от 1 до 28 шт/м³ в 2019 году и от 1 до 40 шт/м³ в 2021 году, однако методы

идентификации частиц и координаты точек отбора проб в этих исследованиях различаются, что препятствует прямому сравнению.

Наиболее встречаемая размерная категория микропластиковых частиц – 500-1000 мкм. Преобладающее количество частиц (91%) являлось волокнами. Больше всего было обнаружено прозрачных частиц – 70%, а 15% были черного цвета. Самые встречаемые полимеры – полиэтилентерефталат (49% всех идентифицированных частиц), полиэтилен (19%) и полиакрилат (14%). Источником фрагментированного ПЭТ служит прозрачная тара, тогда как волокна, более известные как «лавсан», очень часто применяются для изготовления одежды и техники (вероятнее всего поступают в море с коммунальными стоками). Фрагменты полиэтилена могут отделяться от упаковочных материалов или изделий (бытовая техника, трубы) в процессе их использования. Источником полиакрилатов могут служить лакокрасочные покрытия судов [1]. В некоторых пробах были обнаружены другие виды полимеров: полиамид (синтетические волокна после стирки одежды), полипропилен (промышленные волокна), поливинилацетат, поликапролактон и полиакриловая кислота.

Список литературы

- 1) Чубаренко И.П., Есюкова Е.Е., Хатмуллина Л.И., Лобчук О.И., Исаченко И.А., Буканова Т.В. Микропластик в морской среде // М. : Научный мир, 2021. 520 с.
- 2) Van Sebille E., England M. H., Froyland G. Origin, dynamics and evolution of ocean garbage patches from observed surface drifters // *Environmental Research Letters*. Vol. 7. 2012. P. 044040.
- 3) Ершова А.А. и др. Микропластиковое загрязнение морской среды Баренцева и Карского морей в 2019 г. // *Гидрометеорология и экология*. № 69. 2022. С. 691–711.
- 4) Ершова А.А. и др. Исследование загрязнения микропластиком морей Российской Арктики и Дальнего Востока // *Арктика: экология и экономика*. Т. 11(2). 2021. С. 164–177.
- 5) Zhdanov I. et al. Assessment of seasonal variability of input of microplastics from the Northern Dvina River to the Arctic Ocean // *Marine Pollution Bulletin*. P. 175. 2022. P. 113370.

ПОДВИЖНЫЙ ФОСФОР В ДОННЫХ ОСАДКАХ ФОРЕЛЕВОГО ХОЗЯЙСТВА (ЯККИМВААРСКИЙ ЗАЛИВ)

Лапенков А.Е., Зарипова К.М., Гузева А.В.

Институт озерадения РАН, СПбФИЦ РАН, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Фосфор, форелевые хозяйства, Ладожское озеро, донные отложения.

Аквакультура, и в частности рыбоводство, может быть эффективным методом производства богатых белком продуктов питания, однако без надлежащего контроля рыбоводные хозяйства могут оказывать негативное влияние на окружающую среду [1]. Одной из ключевых экологических проблем являются отходы рыбоводческого хозяйства, включающие продукты жизнедеятельности рыб и остатки корма, содержащие большое количество фосфора. Повышенная фосфорная нагрузка на водную систему может иметь значительные последствия.

Фосфор - это биогенный элемент, который играет важную роль в росте растений и животных. Избыток фосфора в водоеме может привести к развитию процесса эвтрофикации, в ходе которого происходит понижение содержания кислорода в воде. Процесс гипоксии может нарушить развитие рыб и других гидробионтов. Фосфор может попасть в водоем различными путями, в частности с продуктами метаболизма рыб и накапливаться в донных отложениях. Формы содержания фосфора в донных осадках зависят от физико-химических условий среды, присутствия других химических веществ и типа отложений. При изменении окислительно-восстановительного потенциала и кислотности среды фосфор может высвобождаться обратно в водную толщу, создавая опасность вторичного загрязнения, и вносить свой вклад в общую фосфорную нагрузку [2].

В бухте Яккимваара Ладожского озера было проведено исследование пространственно-временной динамики подвижных форм фосфора в донных отложениях под форелевой фермой с мощностью выпуска от 200 до 1000 т рыбы в год. Отбор проб производился в разные гидрологические сезоны года, включая зиму (23-24 февраля), весну (3-5 июня), лето (4-6 августа) и осень (26-27 октября). Осадки отбирали гравитационной трубкой Limnos (Финляндия). Сразу после отбора проб на основании визуального анализа признаков стратификации керны разрезали на слои по 1-5 см. Для послойного анализа содержания подвижных форм фосфора в донных осадках был использован метод извлечения подвижных фосфатов Кирсанова [3].

Результаты показали, что уровень содержания фосфора был низким зимой (около 0,1% сухого вещества) и начал увеличиваться весной, достигая максимального уровня летом в поверхностном слое донных отложений (до 2,4% сухого вещества). Осенью уровень фосфора стал снижаться. Кроме того, содержание подвижного фосфора в осадках уменьшалось с глубиной залегания слоя донных отложений до менее 0,1% сухого вещества во все сезоны. Максимальная мощность слоя повышенных значений содержания подвижного фосфора была зафиксирована в октябре и составляла 18 см.

Результаты оценки пространственной динамики содержания подвижных форм фосфора в донных отложениях показали, что увеличение внутренней биогенной нагрузки на акваторию носит локальный характер и ограничивается границами изучаемой бухты. Самые высокие уровни содержания фосфора были обнаружены в отложениях непосредственно под садками с радужной форелью, а в контрольных точках, расположенных на расстоянии 150 и 600 метров, содержание подвижного фосфора было низким и не превышало 0,1% сухого вещества.

В исследовании подчеркивается важность надлежащего управления рыбными хозяйствами для сведения к минимуму их негативного воздействия на окружающую среду, включая потенциальную возможность избыточного поступления фосфора в водную толщу. Для понимания долгосрочного

воздействия рыбоводства на уровень содержания фосфора и потенциальные риски для водных экосистем необходимы дальнейшие исследования.

Авторы выражают благодарность Хлунову О.В., директору хозяйства, Легкому А.С., главному рыбоводу и Паршукову А.Н., ихтиопатологу, за предоставленную возможность в сборе материала.

Работы выполнены при поддержке гранта РНФ № 23-24-00202.

Список литературы

- 1) Lapenkov A., Guzeva A., Zaripova K., Slukovskii Z. The seasonal dynamics of geochemical characteristics of sediments in the impact zone of the fish farm (Lake Ladoga, Russia) // Aquaculture and Fisheries. 2022. P. 7. <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.09.003>
- 2) Wong J. W. C., Yang C. L. The effect of ph and redox potential on the release of nutrients and heavy metals from a contaminated marine sediment// Toxicological & Environmental Chemistry. Vol. 62(1-4). 1997. P. 1-10
- 3) ГОСТ Р 54650-2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО: дата введения 2013-01-01. М.: Стандартинформ. 2013. 7 с.

ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МАКРОЗООБЕНТОСА БИОЦЕНОЗА *ZOSTERA MARINA* РАЗНЫХ ШИРОТНЫХ ЗОН

Любимов И.В., Колючкина Г.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: гидробиология, экология, донные сообщества, морские травы, Азовское море, Белое море, функциональный анализ.

Морские травы являются одними из прибрежных эдификаторов, образуя обширные подводные луга. В северном полушарии от Субарктики до Южных морей РФ один из наиболее распространенных видов морских трав - *Zostera marina* L. Высокая продукция zostеры делает эти биоценозы важным звеном в утилизации атмосферного углекислого газа. В настоящей работе была предпринята попытка оценить структуру макрозообентоса двух географически удаленных биоценозов *Z. marina* – Кандалакшского залива Белого моря и Таманского залива Азовского моря с использованием двух подходов – традиционного, основанного на видовом составе сообществ и альтернативном, основанном на оценке функционирования сообществ (Biological Traits Analysis – ВТА, [1]), а также выявлении обилия в них организмов, принимающих участие в секвестировании углерода.

Пробы были собраны в 2009 г. (Таманский залив, 2.7-3.0 м, 49 проб) и 2021 г. (Кандалакшский залив, верхняя сублитораль, 18 проб) по единой методике. Макрозообентос был, по возможности, определен до вида, определены численность и биомасса видов в пробах. Для анализа видового богатства и разнообразия использовали индекс биоразнообразия Шеннона (H'). В качестве меры обилия макрозообентоса использовали интенсивности метаболизма [2]. Вид, имеющий наибольшую интенсивность метаболизма, считался доминирующим. Статистическую обработку проводили в программе Primer v.6.1, Statistica 12.5 и пакете R ade4. Для функционального анализа использовали следующий набор признаков: тип питания, подвижность, наибольшие размеры, продолжительность жизни, положение в пространстве, плодовитость, возраст наступления половой зрелости, тип личиночного развития [1]. Достоверность отличий проверяли критерием Манна-Уитни.

В Кандалакшском заливе было найдено 29 видов макрозообентоса (от 6 до 12 на пробу), а в Таманском заливе – 45 (от 6 до 21 на пробу). Кривая накопления видов с увеличением числа проб в Таманском заливе проходила выше (прирост числа видов в пробах было выше в Таманском заливе), число видов, не смотря на разницу в исследованном количестве проб, в Таманском заливе была достоверно выше. Различия в **средней численности** макрозообентоса для двух биоценозов были недостоверными: в Таманском заливе 5067 ± 1743 экз./м², в Кандалакшском 6760 ± 5216 экз./м². **Индекс Шеннона** составлял для Таманского залива 1.71 ± 0.44 (от 0.96 до 2.38), для Кандалакшского залива 1.39 ± 0.37 (от 0.92 до 1.92), отличия были недостоверными. **Биомасса** макрозообентоса в Таманском заливе была достоверно выше в 3 раза по сравнению с беломорской (466 ± 424 г/м² и 196 ± 172 г/м², соответственно). Выше было и содержание раковин моллюсков в общей биомассе сообществ ($16-564$ г/м² в Белом море, $50-1200$ г/м² в Таманском заливе).

При помощи многомерного анализа (MDS) было выявлено три основных группы станций в Таманском заливе на уровне 53% сходства. Сходство и различия этих групп определяли брюхоногий моллюск *Bittium reticulatum* и двустворчатые моллюски *Mytilaster lineatus*, *Abra segmentum* и *Mytilus galloprovincialis*. Первые два вида были доминирующими на 57% станций, в западной и восточной части залива, а на остальных, в северной части доминировали *M. lineatus* и *A. segmentum*. В Кандалакшском заливе выделялись две группы станций на уровне сходства 35%. Основные различия и сходство определяли *Mytilus edulis*, *Hydrobia ulvae*, *Macoma balthica* и *Littorina littorea*. Эти

виды встречались на всех станциях, и основные отличия достигались лишь за счет структуры доминирования. На станции в эстуарии, ближайшей к опресненному участку, доминировала *Macoma balthica*. На соседней станции вне биоценоза zostеры – *M. edulis*. На двух станциях с промежуточными значениями солености в эстуарии – *H. ulvae* и *Littorina saxatilis*. В г. Грязная – *M. edulis*, *H. ulvae*, *M. balthica*, а на о. Оленевский, где опреснение действует в гораздо меньшей степени, доминировали *M. edulis* и *L. littorea*. Для этих биоценозов двух разных географических зон был найден лишь один общий макрозообентосный вид (полихета *Harmothoe imbricata*), который не был доминирующим ни в одном из них. В беломорском биоценозе его встречаемость не превышала 11%, а в таманском достигала 90%.

Функциональный анализ показал, что сообщества макрозообентоса zostеры Таманского и Кандалакшского заливов имели высокую степень сходства. Ведущими признаками, определяющими сходство и различия станций, являлись тип питания, образ жизни и плодовитость (объясняли 60% общей вариации). Высокая степень сходства по типу питания объяснялась преобладанием фильтраторов и растительноядных микрофагов в обоих биоценозах, по образу жизни – превалярованием роющих, ползающих и прикрепленных форм. По плодовитости сходство достигалось за счёт организмов, отличающихся малыми (10-100 яиц) и высокими (10000-1млн. яиц) показателями плодовитости, сверхвысокие (>1млн. яиц) показатели этого признака, напротив, играли значимую роль лишь в беломорских сообществах. В Таманском заливе преобладали животные, имеющие пелагическую личинку, а в Кандалакшском - бентосную и короткопелагическую.

Не смотря на практически полное несовпадение видового состава биоценозов макрозообентоса *Z. marina* в разных географических зонах были близки по функциональной структуре. Преобладание двустворчатых моллюсков, дающих высокие показатели биомассы и веса раковины, а также обилие первичного продуцента zostеры делает эти уязвимые прибрежные экосистемы одним из потенциальных секвесторов углекислого газа.

Работа поддержана грантом РФФИ № 23-27-00181.

Список литературы

- 1) Bremner J., Rogers S.I., Frid C.L.J. Methods for describing ecological functioning of marine benthic assemblages using biological traits analysis (BTA) // Ecol. Indic. Vol. 6(3). 2006. P. 609–622.
- 2) Кучерук Н.В., Савилова Т.А. Количественная и экологическая характеристика донной фауны шельфа и верхнего склона района североперуанского апвеллинга // Бюлл. МОИП, Отд. биол. Т. 89 (4). 1985. С.59–70.

ШИРОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ^{137}Cs В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 2020 Г.

Мирошниченко О.Н., Сидоров И.Г., Параскив А.А.

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: цезий-137, глобальные выпадения, Атлантический океан.

Цезий-137 является долгоживущим антропогенным радионуклидом с периодом полураспада 30.17 года, образующимся при эксплуатации объектов атомной энергии, а также при ядерных взрывах. За период бомбовых испытаний на акваторию Атлантического океана поступило порядка 201.1 ПБк цезия-137, что составило треть от суммарного количества глобального цезия-137, выпавшего на поверхность Мирового океана [1]. Известно, что испытания ядерного оружия над акваторией Атлантического океана не проводились, поэтому поступление бомбового цезия-137 происходило за счет глобальных атмосферных выпадений посредством циркуляции радиоактивных аэрозолей в слоях атмосферы. Максимумы радиоактивного загрязнения в результате глобальных выпадений в Атлантическом океане относились к средним широтам Южного и Северного полушарий [1]. Кроме того, глобальные бомбовые выпадения преобладали в Северном полушарии, по сравнению с Южным, что обусловлено меньшим количеством испытательных взрывов, а также ограниченным атмосферным обменом между северной и южной стратосферами [1].

После окончания ядерных испытаний происходило снижение концентрации цезия-137 в северной, центральной и южной частях Атлантического океана с периодами полууменьшения, равными 18.6, 23.7, 20.2 года соответственно, и 20.4 года для всего Атлантического океана [1].

Цель настоящего исследования – изучение широтного трансатлантического распределения антропогенного радионуклида цезия-137 в современный период.

Пробы поверхностной воды были отобраны в 4 этапе 79 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш», который проходил в марте – мае 2020 г. Пробы отбирались в открытой части Атлантики в диапазоне от 50° южной широты по 46° северной широты. Активность цезия-137 в пробах воды измеряли на NaI(Tl) гамма-спектрометре с блоком детектирования БДЕГ-100 по дочернему гамма-излучающему радионуклиду $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Относительная погрешность полученных результатов не превышала 20%. Методика извлечения цезия-137 из проб воды описана в работе [2].

Концентрация цезия-137 в поверхностной воде Атлантического океана лежала в диапазоне с 0.65 ± 0.1 по 1.44 ± 0.2 Бк/м³. В Северной Атлантике средняя концентрация составила 1.2 ± 0.2 Бк/м³, в Южной Атлантике – 0.9 ± 0.1 Бк/м³. Отмечается, что максимумы концентраций относились к средним широтам Южного и Северного полушарий соответственно. Полученные результаты по широтному распределению цезия-137 в Атлантическом океане согласуются с тенденциями распределения глобальных радиоактивных впадений в Мировом океане. Вместе с тем, по сравнению с предыдущими оценками, выполненными несколько десятилетий ранее [3-5], наблюдается сглаживание пиков активности цезия-137, обусловленное выравниванием полей концентрации под воздействием гидродинамических процессов, что подчеркивает их важную роль в миграции консервативных техногенных радионуклидов в Мировом океане.

Проведен сравнительный анализ полученных результатов с ранее выполненными исследованиями по распределению цезия-137 в Атлантическом океане [3-5]. Средняя концентрация цезия-137 в исследуемом диапазоне широт Атлантического океана снизилась в 2 раза по сравнению с данными экспедиции 1988-1989 гг., и в 1.5 раза по сравнению с 1992-1993 гг. Вместе с тем, по сравнению с данными, полученными в 2002 г., средняя концентрация цезия-137 в Атлантическом океане за 20 лет практически не изменилась. Это, по-видимому, связано с глобальной циркуляцией

вод Мирового океана и поступлением дополнительных количеств цезия-137 из других акваторий, с более высоким содержанием этого радионуклида [6].

Таким образом, широтное распределение цезия-137 по данным 2020 г. в поверхностной воде Атлантического океана соответствует установленным закономерностям распределения радионуклидов в результате глобальных выпадений. Период полужизни концентрации цезия-137 в Атлантическом океане на масштабе последних трех десятилетий сопоставим с временем радиоактивного распада атомов цезия.

Работа подготовлена в рамках темы государственного задания ФИЦ ИнБЮМ "Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем", номер государственной регистрации 121031500515-8. Исследования в Атлантическом океане выполнены в рамках темы государственного задания ФИЦ ИнБЮМ «Комплексные исследования современного состояния экосистемы атлантического сектора Антарктики», номер государственной регистрации 121090800137-6.

Список литературы

- 1) Aarkrog A. Radionuclide levels in oceans and seas // In: Worldwide marine radioactivity studies (WOMARS). Vol. IAEA-TECDOC-1429. Vienna: IAEA, 2005. 187 pp.
- 2) Miroshnichenko O.N., Paraskiv A.A., Gulin S.B. Cesium-137 Concentration in the Surface Waters of Eurasian Seas: Evidence from the Expedition Research of 2017 // *Geochemistry International*. № 57(12). 2019. P. 1349–1354.
- 3) Holm E., Roos P., Josefsson D., Persson B. Radioactivity from the North Pole to the Antarctic // In: Gue´gue´niat P., Germain P., Me´tivier H. (Eds.), *Radionuclides in the oceans: inputs and inventories*. IPSN, Editions de Physique, 1996. P. 59-74.
- 4) Bourlat Y., Millie´s-Lacroix J.-C., Le Petit G., Bourguignon J. ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs and ²³⁹⁻²⁴⁰Pu in world ocean water samples collected from 1992 to 1994 // In: Gue´gue´niat, P., Germain, P., Me´tivier, H. (Eds.), *Radionuclides in the oceans: inputs and inventories*. IPSN, Editions de Physique, 1996. P. 75-93.
- 5) Gulin S.B., Stokozov N.A. ¹³⁷Cs concentrations in Atlantic and western Antarctic surface waters: results of the 7th Ukrainian Antarctic Expedition, 2002 // *Journal of environmental radioactivity*. № 83(1). 2005. P.1-7.
- 6) Sanchez-Cabeza, J.A., Levy, I., Gastaud J., Eriksson M., Osvath I., Aoyama M., Povinec P.P., Komura K. Transport of North Pacific ¹³⁷Cs labeled waters to the south-eastern Atlantic Ocean // *Progress in Oceanography*. № 89 (1-4). 2011. P. 31–37.

ЭВТРОФИРОВАНИЕ И КАЧЕСТВО ВОД КАЛИНИНГРАДСКОГО МОРСКОГО КАНАЛА И ПРИЛЕГАЮЩИХ ВОД КАЛИНИНГРАДСКОГО ЗАЛИВА ПО КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА В 2022 Г.

Носкова Т.А.¹, Александров С.В.²

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: хлорофилл, Калининградский залив, Калининградский морской канал, качество вод, трофический статус.

Калининградский или Вислинский залив - одна из крупнейших прибрежных лагунных экосистем, отделенная от Балтийского моря песчаной косой. Калининградский морской канал расположен у северного берега залива, от которого отделен насыпными дамбами, и является составной частью эстуария реки Преголи. Канал представляет гидротехническое сооружение, построенное в 1901 г., длиной 43 км, глубиной 9-12 м. Экосистема Калининградского залива и морского канала находится под сильным воздействием природных (заток морских вод, речной сток, климатические изменения) и антропогенных (поступление биогенных и загрязняющих веществ) факторов, оказывающих влияние на эвтрофирование и качество вод [1]. Максимальный уровень эвтрофирования наблюдается в восточной части, куда поступает основная биогенная нагрузка на залив со стоком р. Преголя. В этом районе также находится выпуск сточных вод Калининграда, обуславливая значительное антропогенное поступление азота и фосфора [2]. В начале морского канала в пределах Калининграда расположен крупный морской порт, а вдоль канала находится ряд крупнейших промышленных предприятий Калининградской области (судоремонт, нефтехимия, рыбопереработка, ГРЭС и другие).

Хлорофилл «а» - основной пигмент фитопланктона, являющийся индикатором эвтрофирования и качества вод. Весной и осенью 2022 г. проанализирована пространственная изменчивость хлорофилла на акватории Калининградского залива и морского канала от устья р. Преголя, расположенного в восточной части, до морского пролива. Пробы воды для определения хлорофилла «а» отбирали в поверхностном и придонном слоях и обрабатывали согласно ГОСТ 17.1.04.02-90. Полученные данные были усреднены для столба воды, что в условиях отсутствия стратификации вод позволяло получать более объективные оценки, а также это является требованием в использованной классификации качества вод.

Исследования хлорофилла «а» в весенний период (25 мая) 2022 г. показали следующие особенности его пространственного распределения в Калининградском заливе и морском канале. Концентрации хлорофилла «а» в Калининградском заливе варьировали в диапазоне 18-40 мкг/л, а в морском канале - 9-53 мкг/л, составляя в среднем соответственно 27 и 35 мкг/л. Наибольшие концентрации были в восточной части залива и канала (27-53 мкг/л), где поступление биогенных элементов с речным стоком и сточными водами Калининграда стимулирует развитие фитопланктона. Значительное снижение концентраций хлорофилла «а» (до 9-20 мкг/л) отмечено в районе морского пролива и гидрогавани, под влиянием затока менее продуктивных вод Балтийского моря. Осенью (13 октября) концентрации хлорофилла «а» в Калининградском заливе варьировали в диапазоне 4-16 мкг/л, а в морском канале - 7-34 мкг/л, составляя в среднем 10 и 16 мкг/л. Наибольшие концентрации были в восточной части залива и канала, где сказывалось поступление биогенных элементов с речным стоком и загрязнениями, поступающими из Калининграда и с ряда крупных промышленных предприятий в районе п. Ижевское и г. Светлый. Наименьшие концентрации хлорофилла «а» (4-11 мкг/л) отмечены у морского пролива и центральном районе залива, что связано с интенсивным в осенний период затокном вод Балтийского моря. Также отмечено снижение хлорофилла «а» в поверхностном слое в устье Преголи, отражая поступление

речных вод. Близкие величины (8-33, в среднем 19 мкг/л) и сходное пространственное распределение наблюдалось при аналогичном исследовании, выполненном в октябре 2021 г. [3]

Концентрации хлорофилла как показатель обилия фитопланктона являются важнейшим критерием в современных классификациях трофности вод. Оценка уровня эвтрофирования вод была выполнена согласно классификации трофности вод [4]. На основной акватории морского канала и Калининградского залива наблюдался эвтрофный уровень (хлорофилла «а» 8-25 мкг/л). В восточной части в районе расположения Калининградской агломерации и ряда крупных промышленных предприятий, где поступление биогенных элементов со сточными водами и с речным стоком стимулирует развитие фитопланктона, отмечено гипертрофное состояние (концентрации хлорофилла «а» > 25 мкг/л). Наблюдавшийся уровень эвтрофирования вод и его пространственное распределение соответствует многолетним данным, полученным для залива [1]. Хлорофилл «а» является одним из показателей качества вод, характеризуя загрязнение биогенами и уровень развития водорослей. Его концентрации на акватории Калининградского залива и в морском канале в весенний и осенний периоды соответствовали условно «допустимому» уровню (12-30 мкг/л), согласно классификации [5]. В восточном районе, где наблюдалось интенсивное развитие фитопланктона (особенно весной), качество вод снижалось до условно «плохого» уровня (концентрации хлорофилла «а» более 30 мкг/л), что отражает сложившееся состояние загрязнения и эвтрофирования Калининградского залива и морского канала.

В целом для Калининградского залива и морского канала наблюдалась сходное пространственное распределение хлорофилла «а», уровень эвтрофирования и качества вод что обусловлено их взаимодействием между собой и влиянием речного стока и г. Калининграда в восточной части и затока морских вод в западной части.

Список литературы

- 1) Александров С.В. Современное экологическое состояние и загрязнение Куршского и Вислинского заливов Балтийского моря // Вода: химия и экология. №11 (41). 2011. С. 3-9.
- 2) Александров С.В., Горбунова Ю.А. Биогенная нагрузка на Вислинский залив со стоком реки Преголя // Вода: химия и экология. №1 (19). 2010. С. 4-8.
- 3) Александров С.В., Носкова Т.А. Эвтрофирование и качество вод Калининградского морского канала по концентрации хлорофилла «а» в 2021 г. // Сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием “XXIX Береговая конференция: Натурные и теоретические исследования - в практику берегопользования”, г. Калининград, 18-24 апреля 2022 г. Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта. 2022. С. 157-159.
- 4) OECD: Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. Paris, 1982. 154 p.
- 5) Vuoristo H. Water quality classification of Finnish waters // European Water Management. №1 (6). 2011. P. 35-41.

ПОТОКИ МИГРАЦИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОИЗОТОПОВ ПЛУТОНИЯ В ПРИБРЕЖНЫХ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМАХ НА ПРИМЕРЕ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ

Параскив А.А., Терещенко Н.Н., Проскурнин В.Ю., Чужикова-Проскурнина О.Д.,
Вахрушев М.О.

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: радиоизотопы плутония, Севастопольская бухта, Черное море.

Актуальной задачей фундаментальной науки является изучение природных процессов, обеспечивающих самоочищение водных экосистем от техногенных веществ, к которым относятся радиоактивные вещества антропогенного происхождения, начавшие поступать в водные экосистемы во второй половине XX века. Их источником являются используемые в мирных и военных целях ядерные технологии, а также аварии на радиационных объектах [1].

В современный период среди техногенных радионуклидов одними из основных дозообразующих радиоизотопов являются альфа-излучающие радиоизотопы плутония ^{239}Pu и ^{240}Pu с периодами полураспада 24110 и 6563 лет, соответственно. Количественная оценка потоков миграции и перераспределения данных долгоживущих радиоизотопов в прибрежных черноморских экосистемах, интенсивно используемых человеком в различных областях, представляет несомненный интерес.

Целью настоящей работы была количественная оценка потоков миграции и распределения техногенных радиоизотопов плутония в прибрежной морской экосистеме на примере Севастопольской бухты (Черное море).

Были оценены седиментационный, гидрологический и макробиотический потоки распределения $^{239+240}\text{Pu}$ на основе натуральных данных по их содержанию в воде, донных отложениях и гидробионтах бухты, а также показан вклад радиоактивного распада. Исследования проводились в Севастопольской бухте и акватории ее внешнего рейда в период 2016–2021 гг. Радиохимическая обработка проб проводилась согласно общепринятой методике [2], активность изотопов $^{239+240}\text{Pu}$ измеряли на альфа-спектрометре «ORTEC».

Удельный гидрологический поток миграции радиоизотопов плутония из водных масс бухты в открытую часть моря был оценен исходя из полученных результатов по удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в воде, а также литературных данных о морфометрических характеристиках бухты и периоде водообмена ее водных масс с открытым районом моря [3]. Изучение вертикального распределения $^{239+240}\text{Pu}$, а также ^{238}Pu , в донных осадках бухты, позволило провести количественную оценку скорости осадконакопления и абсолютных масс донных осадков. В свою очередь, на основе этих данных были рассчитаны удельные седиментационные потоки $^{239+240}\text{Pu}$ в донные отложения бухты [4]. Среди гидробионтов в Севастопольской бухте были изучены представители бурых макрородослей *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata*, моллюски – *Mytilus galloprovincialis* и рыбы *Scorpaena porcus*. На основе полученных данных об удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в изученных видах биоты, а также литературных данных по биомассе и продукции гидробионтов бухты [5] был оценен удельный биотический поток выноса $^{239+240}\text{Pu}$.

Установлено, что суммарный удельный поток $^{239+240}\text{Pu}$ из водных масс Севастопольской бухты составил $1678 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. При этом показано, что удельный гидрологический поток $^{239+240}\text{Pu}$ из акватории бухты в открытую часть моря составил $12,7 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, то есть 0,76 % от суммарного потока. Вклад биоты в самоочищение вод от $^{239+240}\text{Pu}$ составил $25,3 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, т.е. 1,51 % от величины суммарного удельного потока. Радиоактивный распад не вносит существенного вклада в уменьшение $^{239+240}\text{Pu}$ в воде бухты, за его счет суммарный поток уменьшился

лишь на 0,007 %. На долю же седиментационного потока приходилось $1640 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$ – более 97 % от суммарного потока элиминации плутония из воды. С привлечением литературных данных [6] оценен вклад литогенной и биогенной составляющей осадочного вещества, и показано, что на долю литогенной составляющей приходилось 57,81 %, а на долю биогенной – 39,92 % от суммарного удельного потока $^{239+240}\text{Pu}$. Следовательно, показано большое влияние биогенного вещества на изучаемые процессы формирования самоочистительной способности вод в отношении радиоизотопов плутония. И принимая во внимание, что биогенное осадочное вещество является результатом жизнедеятельности живых организмов, то можно оценить суммарный вклад живого вещества (включая макробиотический поток и биогенную составляющую седиментационного потока, поступившую в осадочное вещество) в процесс самоочищения вод от $^{239+240}\text{Pu}$ в морских прибрежных экосистемах, который составил более 40 %.

Таким образом, в результате проведенных исследований количественно оценены потоки миграции и распределения техногенных радиоизотопов плутония в прибрежной морской экосистеме на примере Севастопольской бухты. Установлено, что основным потоком выведения $^{239+240}\text{Pu}$ (более 97 %) из водных масс является седиментационный поток взвешенного вещества в донные отложения. Вклад радиоактивного распада, гидрологических процессов и накопления $^{239+240}\text{Pu}$ макроводорослями, двустворчатými моллюсками и донными рыбами являлся незначительным. При этом, однако, показана существенная роль живого вещества в протекании процессов самоочищения водных масс акватории бухты в отношении техногенных радиоизотопов плутония.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ по научному гранту Аспиранты № 20-35-900041 и в рамках темы государственного задания ФИЦ ИнБЮМ № 121031500515-8.

Список литературы

- 1) Egorov V.N. Theory of Radioisotopic and Chemical Homeostasis of Marine Ecosystems. Cham, Switzerland: Springer, 2021. 320 p.
- 2) Методика измерений активности плутония-239,240,238 в пробах окружающей среды с радиохимическим концентрированием в ФГБУ «НПО «Тайфун». № в Реестре методик радиационного контроля МВИ 1.4.7-15. 2015. 25 с.
- 3) Стокозов Н.А. Морфометрические характеристики Севастопольской и Балаклавской бухт // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа № 23. 2010. С. 198-208.
- 4) Егоров В.Н., Гулин С.Б., Малахова Л.В., Мирзоева Н.Ю., Поповичев В.Н., Терещенко Н.Н., Лазоренко Г.Е., Плотицына О.В., Малахова Т.В., Проскурнин В.Ю., Сидоров И.Г., Стецюк А.П., Гулина Л.В. Нормирование качества вод Севастопольской бухты по потокам депонирования загрязняющих веществ в донные отложения // Водные ресурсы № 2(45). 2018. С. 188-195.
- 5) Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма (Черноморский сектор) / под ред. В.Н. Еремеева, А.В. Гаевской. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 511 с.
- 6) Gulina, S.B., Gulina, L.V., Sidorov, I.G., Proskurnin, V.Y., Duka, M.S., Moseichenko, I.N., Rodina, E.A. 40K in the Black Sea: a proxy to estimate biogenic sedimentation // Journal of Environmental Radioactivity V. 134. 2014. P. 21-26.

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЁННОСТИ МОРСКИМ МУСОРОМ ЧЕРНОГО МОРЯ

Погожева М.П.^{1,2}, Гонзалес-Фернандес Д.³, Третьяк И.П.⁴, Котельникова Ю.⁴,
Мачидадзе Н.^{5,6}, Билашвилли К.⁵, Ханке Г.⁷

¹Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, г. Москва

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

³Университет Кадиз, г. Кадиз

⁴Украинский центр экологии моря, г. Одесса

⁵Тбилисский государственный университет им. Иванэ Джавахишвили, г. Тбилиси

⁶Институт Геологии Ал. Джанелидзе, г. Тбилиси

⁷ЕК Центр совместных исследований, г. Испра

Ключевые слова: морской мусор, загрязнение моря, экологический мониторинг, Черное море.

В настоящее время загрязнение морским мусором, особенно состоящим из пластика, является одной из наиболее актуальных проблем антропогенного воздействия на морскую среду в глобальном масштабе. По текущим оценкам количество пластика, поступающего с суши в морскую среду ежегодно, варьируется от 4,5 до 12,7 млн т, еще 1,75 млн т происходит из морских источников, таких как рыболовство, аквакультура (рыбоводство) и судоходство [1]. Макропластик (бутылки, пакеты и пр.) и микропластик (фрагменты и синтетические волокна размером менее 5 мм) обнаруживаются во всех природных средах. В 2013-2020 гг. на Черном море осуществлялся ряд проектов, нацеленных на усовершенствование методов мониторинга морской среды (ЭМБЛАС-I, ЭМБЛАС-II, ЭМБЛАС-Плюс) и выполняющихся в поддержку реализации Бухарестской Конвенции с целью развития системы комплексного мониторинга Черного моря, сбора и управления данными и повышения уровня квалификации профильных специалистов в причерноморских государствах. В рамках этих проектов была проведена первичная оценка загрязненности морским мусором Черного моря в масштабах всего бассейна. Рассматривалось его поступление с водами рек [2], концентрации пляжного и плавающего мусора [3], а также микропластика в водной толще и в донных отложениях. Для регистрации данных о макромуторе использовалась международная методика, включающая визуальные наблюдения и регистрацию мусора с помощью специализированных мобильных приложений. Методика содержит единый перечень и классификацию наблюдаемого мусора, что упрощает процесс обработки и анализа данных и позволяет их сравнивать с данными подобного мониторинга в других районах. Полученные данные помогают получить представление о количестве плавающего мусора, проанализировать его состав по категориям и приблизительный размер. Наблюдения проводились силами предварительно обученных наблюдателей на специально выбранных репрезентативных пляжах, с мостов в устьях рек в течение года и во время проведения комплексных экспедиций на научных судах в море. В зависимости от матрицы/компонента природной среды (поверхность моря, река, пляж, донные отложения и пр.), размерной категории (микро- и макромутор), методики учета (визуальные наблюдения, отбор и анализ проб), были получены следующие результаты в различных размерных категориях. Средняя концентрация пляжного мусора составила 652 шт/100 м (83% пластик), средняя концентрация плавающего мусора составила 90.4 шт/км² (97% пластик) [3,4], а количество мусора, поступающего с водами рек, варьировало от 6 до 72 шт/час (84 % пластик) [2,5]. Микропластик в водной толще был обнаружен в 10 пробах из 14, и в 83% проб донных отложений. Наибольшее содержание частиц микропластика было отмечено в северо-западной шельфовой части моря, средняя концентрация составила 107 шт/кг [6].

В настоящее время существенно недостает данных по оценке уровня загрязнения морским мусором в Черном море и путях его поступления, которые связаны в основном с отсутствием

программ регулярного мониторинга морского мусора в странах Черного моря. В то же время это является глобальной экологической проблемой, которая угрожает морской фауне, прибрежным экосистемам, приморскому населению и развитию морской экономики, включая туристическую индустрию, рыболовство и судоходство. Это постоянно и быстро нарастающая проблема, которую необходимо должным образом решать с помощью целенаправленного сокращения производства пластиковых отходов, регулирования законодательства, усовершенствования системы обращения с отходами и сопутствующей инфраструктуры на местном, национальном и региональном уровнях.

Проект ЭМБЛАС "Усовершенствование методов мониторинга на Черном море"

Список литературы

- 1) Jambeck J.R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T.R., Perryman M., Andrady A., Narayan R., Law K.L. Plastic waste inputs from land into the ocean // *Science*. American Association for the Advancement of Science 347 (6223). 2015. P. 768–771.
- 2) González-Fernández D., Pogojeva M., Hanke G., Machitadze N., Kotelnikova Y., Tretiak I., Savenko O., Gelashvili N., Bilashvili K., Kulagin D., Fedorov A., M. Şenyiğit Ç. Anthropogenic litter input through rivers in the Black Sea // *Marine Litter in the Black Sea*. Turkish Marine Research Foundation (TUDAV) №56. Istanbul, Turkey. 2020. P. 183–191.
- 3) González-Fernández D., Hanke G., Pogojeva M., Machitadze N., Kotelnikova Y., Tretiak I., Savenko O., Bilashvili K., Gelashvili N., Fedorov A., Kulagin D., Terentiev A., Slobodnik J. Floating marine macro litter in the Black Sea: Toward baselines for large scale assessment // *Environmental Pollution* V. 309. 2022. P. 119816.
- 4) Pogojeva M., González-Fernández D., Hanke G., Machitadze N., Kotelnikova Y., Tretiak I., Savenko O., Gelashvili N., Bilashvili K., Kulagin D., Fedorov A. Composition of floating macro litter across the Black Sea // *Marine Litter in the Black Sea*. Turkish Marine Research Foundation (TUDAV) №56. Istanbul, Turkey. 2020. 361 p.
- 5) Pogojeva M., Korshenko E., Osadchiev A. Riverine Litter Flux to the Northeastern Part of the Black Sea // *Journal of Marine Science and Engineering* V. 11. 2023. P. 105.
- 6) Cincinelli A., Scopetani C., Chelazzi D., Martellini T., Pogojeva M., Slobodnik J. Microplastics in the Black Sea sediments // *Science of The Total Environment* V. 760. 2021. P. 143898.

СВЯЗЬ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАВАЮЩЕГО МИКРОПЛАСТИКА В КАРСКОМ МОРЕ С ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ

Поливанова Т.К.

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: микропластик, Карское море.

За последние 60 лет производство пластика в мире выросло до 360 млн т в год. Сколько именно процентов попадает в океан сказать довольно сложно. По оценкам на 2010 год в океан ежегодно поступает от 4.8 до 12.7 млн т пластика [1]. Местом скопления пластика являются глобальные океанические круговороты. Северный Ледовитый океан менее подверженный загрязнению в силу своей изолированности и низкой антропогенной нагрузке. Основным источником загрязнения являются воды Атлантики, которые проникают в Северный Ледовитый океан через пролив Фрама. Первые данные о пластиковом загрязнении в полярных регионах относятся к 1960-м годам, наблюдения за пластиковым мусором и его влиянии на морскую экосистему проводились на Аляске [2].

Крупные плавучие пластиковые предметы были замечены в море в 1970-х годах, такие как пластиковые бутылки, веревки и т. д. [3]. Примерно в то же время исследователи начали брать пробы микропластика из поверхностных вод океана [4]. Конкретные исследования микропластика в Арктике проводились с судов в прибрежной зоне [5], а также отбора проб с поверхности с использованием манта сети [6]. Само понятие микропластик появилось достаточно недавно. Микропластиком принято называть фрагменты или частицы пластика с размерами до 5 мм. Определение нижней границы на данный момент строго не установлено и варьируется в пределах от 1 до 330 мкм.

Основные источники загрязнения микропластиком Арктики: речной сток, судоходная деятельность, атлантические воды и ледовый перенос. В Северный Ледовитый океан поступает 11 % мирового стока пресной воды, основной вклад в который вносят реки Обь (510 м³), Енисей (630 м³) и Лена (530 м³). Расходы этих рек формируют опресненные поверхностные слои на обширных участках континентального шельфа в морях Арктики. Распределение речного микропластика сильно зависит от распределения Обь-Енисейского и Ленского плюмов. Их положения и площадь определяет изменчивость стратификации и циркуляции поверхностного микропластика в Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском морях. Поэтому оценка вклада различных источников загрязнения, их межгодовая и сезонная изменчивость, а также связь распределения микропластика с гидрофизическими и гидрохимическими характеристиками моря является актуальной задачей для исследования.

В данной работе использованы данные по содержанию микропластика (0.5 – 5 мм) в поверхностном слое, собранные с помощью нейстонной сети и в подповерхностном слое, отобранные с помощью фильтрационной системы с глубины 3 м, а также данные по солености, температуре, растворенному кислороду и рН подповерхностного слоя, полученные с помощью датчиков Руго Workbench и SBE. Пробоотбор проводился с 2020 по 2022 гг в 82, 86, 88 и 89 рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» и 58 рейсе НИС «Академик Иоффе». Для определения и идентификации собранных частиц микропластика применялся ИК-Фурье спектрометр (FT-IR), с помощью которого можно точно определить тип полимеров. В 2020 г в Карском море было отобрано 18 проб с поверхностного слоя и 20 проб с подповерхностного слоя. В поверхностном слое в Карском море было найдено 134 микропластиковых частицы, которые преимущественно представлены фрагментами, а в подповерхностном слое общее количество микропластиковых частиц составило 51, из которых 30 были волокнами и 21 фрагментами.

Анализ пространственного распределения частиц микропластика показал, что максимальные концентрации микропластика наблюдаются в западной части Карского моря, в водах с более высокой соленостью (соленость более 30 епс), где средняя концентрация микропластика составила 0.017 и 1.5 шт/м³ для поверхностного и подповерхностного слоя соответственно. Воды восточной части Карского моря, характеризующиеся меньшей соленостью (соленость менее 30 епс), содержали меньше микропластика – 0.011 и 0.8 шт/м³ для поверхностного и подповерхностного слоя соответственно. При этом частицы в подповерхностном слое малосоленых вод были представлены в основном волокнами, вероятно вынесенными реками Обь и Енисей, тогда как в высокосоленых водах большую часть найденных частиц составляли фрагменты. В поверхностном слое наибольшие концентрации микропластика (0.03 шт/м³) наблюдались у пролива Карские ворота. Исследование дает возможность доказать, что переносимый морским и речным путем микропластик, имеет разные физические и химические характеристики, что позволяет различить морской и речной пластик. Пространственное распределение двух типов пластика определяется распространением и трансформацией связанных с ним водных масс, трансформированных атлантических вод и речных шлейфов. Тем самым это дает возможность использовать оценку свойств микропластика для идентификации водных масс.

Список литературы

- 1) Чубаренко И.П., Есюкова Е.Е., Хатмуллина Л.И., Лобчук О.И., Исаченко И.А., Буканова Т.В. Микропластик в морской среде. — Москва: Научный мир, 2021 — 520 с.
- 2) Threlfall W. The food of three species of gulls in Newfoundland // Canadian Field-Naturalist (82). 1986. P. 176–180.
- 3) Venrick E.L., Backman T.W., Bartram W.C., Platt C.J., Thornhill M.S., et al. Man-made Objects on the Surface of the Central North Pacific Ocean // Nature № 5387(241). 1973. P. 271–271.
- 4) Carpenter E.J., Smith K.L. Plastics on the Sargasso Sea Surface // Science № 4027(175). 1972. P. 1240–1241.
- 5) Lusher A.L., Tirelli V., O'Connor I., Officer R. Microplastics in Arctic polar waters: The first reported values of particles in surface and sub-surface samples // Scientific Reports 5. 2015. P. 1–9.
- 6) Cózar A., Martí E., Duarte C.M., García-de-Lomas J., van Sebille E., Ballatore T.J., Eguíluz V.M., González-Gordillo J.I., Pedrotti M.L., Echevarría F., Troublè R., Irigoien X. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation // Science Advances № 4(3). 2017.P. 1–8.

ПОЛИТИКА ФРАНЦИИ В ОБЛАСТИ МОРСКОЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Попов Г.Е.

Российский университет дружбы народов, г. Москва

Ключевые слова: экология, морское природопользование, биоразнообразие, Франция, экологические проблемы моря, загрязнение океанов, мировой океан, экология моря.

Из-за масштабного неправильного использования человечеством пластика, сброса отходов в море и использования нефти возникают глобальные экологические проблемы в сфере Мирового океана. Вследствие этого возникает угроза морскому биоразнообразию, мировой экономике и уровню жизни населения, ведь около 61% мирового ВВП приходится на океаны и прибрежные регионы, расположенные менее, чем в 100 км от побережья [1]. Многие государства сильно зависят от Мирового океана.

Французская Республика является одной из стран с самой сильной экологической политикой, особенно в области Мирового океана. Однако, следует отметить, что большая часть океанов и морей находится в международном пользовании, поэтому решать проблемы с океанами следует всем государствам вместе. Сейчас только 12% всего океана находится под юридической защитой [1]. Это очень мало для изменений на глобальном уровне.

В первую очередь для защиты океана нужно выполнить следующие базовые пункты:

- Установить контроль за ловлей рыбы;
- Предотвратить разлив нефти;
- Охранять морское биоразнообразие;
- Снизить засорение океана пластиком;
- Создать морские охраняемые территории;
- И другие.

Ввиду того, что сейчас лишь небольшая часть стран пытается организовать экологическую помощь океану, остальным государствам следует проанализировать их опыт и перспективы в данной области и построить собственную экологическую политику в области океанов. Самыми активными в сфере развития защиты морской окружающей среды являются страны ЕС и США, в частности из-за того, что Мировой океан оказывает сильное влияние на данные страны. Однако зависимыми от Мирового океана являются не только эти развитые государства, но и развивающиеся страны. Перед развитыми странами стоит задача не только разработать и воплотить меры по защите морской окружающей среды на своей территории, но и помочь в этом развивающимся странам. Ведь все страны и их экономики взаимосвязаны.

В статье мы проанализировали внутреннюю и внешнюю политику Франции в области защиты морской окружающей среды, изучили и описали важнейшие из уже существующих нормативно-правовых актов и выявили ее тенденции и перспективы развития. Так, Франция в XXI веке имеет самые большие амбиции в сфере защиты морской окружающей среды, в сферах сокращения выбросов пластика, незаконного и неконтролируемого рыболовства и охраны морского биоразнообразия. Конкретные нормативно - правовые акты детально рассмотрены в статье. В процессе исследования использовались методы логического и статистического анализа.

В XX веке мировое сообщество и отдельные страны уделяли свое внимание общим направлениям экологической политики, ее фундаменту для будущего. В XX веке были сделаны первые шаги государств в области охраны окружающей среды, заключены первые успешные международные соглашения (Например, Стокгольмский договор) и составлены внутрегосударственные

нормативно- правовые акты по их подобию (Экологический кодекс Франции и других государств). Но в XXI веке экологическая политика усовершенствовалась и, например, Франция заявляет о высоких амбициях в области защиты морской окружающей среды.

Так, Франция участница следующих инициатив и соглашений:

- «Первоначальная стратегия» Международной морской организации;
- Ниулакитская декларация о высоком уровне амбиций в области морских перевозок;
- Конвенция о биологическом разнообразии;
- Коалиции высоких амбиций для природы;
- Ассамблея ООН по вопросу переработки пластика;
- И прочих.

Также в стране существуют различные экологические фонды, например AFD, который выделяет средства на развитие инициатив в области защиты окружающей среды, в том числе и в области защиты морской окружающей среды. Так, этот фонд финансирует проекты в развивающихся странах, например, Инициативу чистых океанов, по предотвращению распространения пластика в Мировом океане [2].

Вышеперечисленная информация подтверждает, что Франция действительно имеет высокие амбиции в сфере развития охраны морской окружающей среды и вследствие переизбрания президента Э. Макрона продолжит и усовершенствует свою политику в данной сфере. Переизбранный президент Франции в своей предвыборной программе заявлял о своих масштабных экологических целях (Поддержание Зеленого курса ЕС, воплощение на практике Парижского договора) [3]. В некотором смысле активность участия Франции в мировой и внутренней политике по защите окружающей среды, в том числе и морской, зависит от президента Франции, поскольку он может более активно реализовывать другие стратегические цели.

Для эффективного развития защиты морской окружающей среды всем странам мира, имеющим отношение к Мировому океану, следует объединиться и соединить усилия в данной сфере. С этой целью, регулярно проводятся международные конференции, финансируются исследования и работают международные фонды. Конечно, у каждой страны есть свои особенности реализации своей политики, но государства все равно стараются придерживаться общего вектора развития, в некоторой степени за счет заключения международных соглашений и взаимной помощи.

Также следует отметить, что мировому сообществу нужно не только заключать новые соглашения и принимать законы внутри государств, а еще и реализовывать взятые на себя обязательства, в том числе над этим необходимо работать и Франции. Так, в стране перерабатывается только 49% пластиковых бутылок, хотя по ее договоренностям это число должно быть больше [1]. Этот пример показывает, что даже в развитых странах осталось еще много работы и таких примеров неисполненных обязательств. Также, Франция выступает за модернизацию экологического права, как международного, так и внутрегосударственного, из-за его специфичности, в нем должны появиться научные термины и стандарты [4]. Этот процесс уже запущен.

Все вышеописанное подробно описано и исследовано в статье и может быть применено для анализа мирового и Французского опыта и тенденций в области защиты морской окружающей среды. Это может послужить для построения понимания о состоянии мировой политики в области защиты морской окружающей среды и роли Франции в развитии данной области, а также для понимания развитости внутренней политики Франции в данной сфере.

Список литературы

- 1) La pollution des océans : définition, causes, et conséquences [Электронный ресурс]. - https://www.conservation-nature.fr/ecologie/la-pollution-des-oceans/#Les_causes_de_la_pollution_des_oceans (дата обращения : 29.12.2022).

- 2) The clean oceans initiative [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.afd.fr/en/ressources/clean-oceans-initiative> (дата обращения: 15.02.2023).
- 3) Le programme d'Emmanuel Macron pour l'environnement et la transition écologique [Электронный ресурс]. – URL: <https://en-marche.fr/emmanuel-macron/le-programme/environnement-et-transition-ecologique> (дата обращения 15.02.2023).
- 4) Michel A. Dictionnaire de l'Écologie // Paris: Encyclopedia Universalis. 2001. 1400 pp.

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ РЕКРЕАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИМОРСКИХ ТЕРРИТОРИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Санин А.Ю.

Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет, г. Москва.

Ключевые слова: Рекреационный потенциал, оценка рекреационного потенциала, приморские туристические территории, внутренний туризм, рекреационная емкость.

В настоящее время растет актуальность развития внутреннего туризма в нашей стране, что признается на самом высоком уровне. Ключевую роль во внутреннем туризме играют приморские рекреационные территории, туристический поток на которые достигает десятки миллионов человек в год, как неорганизованных, так и организованных туристов. Уже в настоящее время, по некоторым данным, это приводит к превышению рекреационной емкости прибрежных территорий, что приводит как к снижению качества отдыха туристов и жизни местных жителей, так и к необратимой трансформации их природных ландшафтов. Она, в свою очередь, может привести к существенному снижению рекреационного потенциала этих территорий в будущем. Решением данной проблемы может быть перераспределение туристических потоков в пространстве и времени, прежде всего, на приморские территории или их участки с наибольшим рекреационным потенциалом.

Рекреационный потенциал проще выявить, чем оценить количественно [1], тем не менее, такая оценка, по меньшей мере, сравнительная, представляется возможной. Существуют различные методики для оценки рекреационного потенциала туристических территорий, часть из которых учитывают преимущественно физико-географические характеристики территории, а часть - социально-экономические [2], но наибольшую ценность из них представляют те, которые учитывают и первые, и вторые, что позволяет осуществить комплексную оценку. Важным представляется рассмотрение полученных результатов на предмет их адекватности после завершения оценивания [3].

Ниже предложена авторская методика оценки, в которой учитываются как физико-географические, так и социально-экономические параметры приморских территорий.

Предлагаемая методика включает в себя оценку по различным параметрам, перечисленным ниже (по каждому из них приводится возможный разброс балльной оценки).

- 1) Природный рекреационный потенциал. Его оценка опирается на климатические характеристики региона и степень их благоприятности для массовой рекреации (1-10 баллов), ландшафтное разнообразие (1-10 баллов), рельеф, эстетическую привлекательность территории (1-10 баллов, определяется разнообразием рельефа, степенью визуального загрязнения инженерными сооружениями, а также ландшафтным разнообразием). Отдельно следует выделить наличие природных достопримечательностей (от 1 до 15 баллов).
- 2) Уровень развития рекреационной инфраструктуры, в частности, наличие подъездных дорог (1-5 баллов), а также средств размещения рекреантов и их разнообразие (1-10 баллов).
- 3) Иные социально-экономические факторы. К ним относятся: криминогенная обстановка в пределах туристической территории (1-5 баллов со знаком минус), отношение местных жителей к туристам (1-5 баллов, может быть знак и плюс, и минус), уровень медицинского обслуживания (1-5 баллов), уровень развития «общепита» (кафе, рестораны, столовые и т.д., 1-5 баллов). Также следует учесть разнообразие предлагаемых экскурсий (1-5 баллов), возможности для культурного досуга, в частности посещения кинотеатров, театров и т.д. (1-5 баллов). Отдельно имеет смысл выделить наличие и разнообразие историко-культурных достопримечательностей (1-15 баллов).

- 4) Уникальность и важность рекреационных ресурсов (например, тех, которые можно использовать для лечения, оздоровления) может быть оценена от 1 до 20 баллов.
- 5) Неблагоприятные и опасные явления природы (НОЯ), которые имеют место на прибрежных рекреационных территориях (от 1 до 20 баллов со знаком минус).
- 6) Конфликты природопользования, которые приводят к снижению качества отдыха (от 1 до 10 баллов со знаком минус).
- 7) Степень неблагоприятности экологической обстановки (1-20 баллов со знаком минус).

Отметим, что многие из перечисленных составляющих оценки рекреационного потенциала характеризуются отрицательными значениями. Необходимость присвоения баллов со знаком «минус» для «условий, препятствующих осуществлению тура», отмечена в литературе [4]. Безусловно, для неорганизованных туристов они также снижают качество отдыха. Диапазон оценивания для каждого фактора тоже различен - большинство может иметь максимальную оценку 5 баллов со знаком плюс или минус, но некоторые представляются особо важными, оказывающими наибольшее влияние на качество отдыха, и сильно отличающимися в зависимости от выбранного места отдыха. Для них возможны оценки до 15 баллов.

Предлагаемая методика применялась для оценки рекреационного потенциала для отдельных участков берега приморских территорий, для которых характерен массовый туризм, относящихся к Балтийскому, Азовскому, Черному, Каспийскому и Японскому морям, а также внутренних водных объектах, популярных среди туристов. Получены суммарные оценки в диапазоне примерно от 40 до 70 баллов, их различие объясняется различным уровнем ландшафтного разнообразия, транспортной доступности и уровнем развития рекреационной инфраструктуры в целом, "обеспеченностью" территории природными и культурно-историческими памятниками и рядом других факторов. Результаты применения приведенной выше методики (особенно в случае использования средних значений оценок разных экспертов для повышения их точности) позволят выявить как отдельные участки берега с наиболее высоким рекреационным потенциалом, так и «недооцененные» в целом приморские районы, что следует учитывать при разработке рекомендаций по перераспределению туристических потоков в пространстве и времени. При прочих равных условиях стимулирование «рекреационного освоения» участков побережья и районов в целом с наибольшим рекреационным потенциалом даст лучшие результаты в сравнении с усилиями, направленными на развитие туризма на прочих участках побережья и в других районах. В свою очередь, осуществление оценки рекреационного потенциала для конкретного населенного пункта позволяет выявить "узкие места", ее снижающие, негативное воздействие которых часто можно устранить или смягчить.

Общепринятый метод оценки рекреационного потенциала на текущий момент отсутствует [2]. Представленная методика не претендует на единственно возможный вариант такого общепринятого метода, тем более она составлена «с прицелом» именно на приморские территории, которые несмотря на свою популярность, замыкают на себя далеко не весь туристический поток внутри России. Однако при условии учета особенностей оцениваемых регионов и конкретных участков берега ее использование представляется вполне возможным.

Список литературы

- 1) Кусков А.В. и др. Рекреационная география. Учебно-методический комплекс. Минск, 2003. – 504 с.
- 2) Сафарян А. А. Подходы к оценке туристского потенциала территории // Географический вестник №1(32). 2015. С. 89-101.

- 3) Худеньких Ю.А. Подходы к оценке туристического потенциала территории на примере районов Пермского края // География и туризм: сб. науч. тр. Вып. 2. Пермь: Изд-во Перм. Унта, 2006. С. 217-230.
- 4) Дроздов А. В. Экотуризм: определения, принципы, признаки, формы // Актуальные проблемы туризма-99. Перспективы развития туризма в южном Подмоскowie: сб. докл. и тез. Сообщений научно-практ. конф. 27 апреля 1999 г., М., 1999. С. 122-129.

РАЗРАБОТКА БАЗОВОГО НАБОРА ИНДИКАТОРОВ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ ЗОН

АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН

Семенова Е.Е.¹, Хаймина О.В.¹

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: комплексное управление прибрежными зонами, индикаторные методы, DPSIR, архипелаг Шпицберген.

Арктика - это хрупкая экологическая и климатическая система, чувствительная к внешним воздействиям. Отличие экосистемы Арктики от экосистем других природных зон и биомов в том, что они не имеют «путей отступления» [1]. Среди других полярных регионов архипелаг Шпицберген выделяется своим расположением, его условно можно назвать воротами в Арктику.

В последние несколько десятилетий интерес к этому арктическому региону возрос как со стороны отечественных исследователей [1-3], так и со стороны Норвегии, Польши [4] и других стран. Наиболее масштабные исследования проводятся Норвегией. С 1993 года в поселке Лонгиир действует Университетский центр на Шпицбергене (University Centre in Svalbard, UNIS), занимающийся как научными исследованиями архипелага, так и образовательной деятельностью. В 2015 году запущена система мониторинга архипелага MOSJ (Miljøovervåking Svalbard og Jan Mayen - экологический мониторинг Шпицбергена и Ян-Майена) [5].

Однако проблема рационального промышленного и рекреационного освоения архипелага остается актуальной. Это связано с многообразием факторов, определяющих как состояние экосистемы архипелага, так и направления развития хозяйственной деятельности в существующем геополитическом контексте.

Реализация стратегии устойчивого развития региона требует разработки ряда базовых индикаторов, отражающих состояние и изменения в окружающей среде архипелага, динамику развития различных отраслей хозяйственной деятельности и другие аспекты для более четкой кооперации всех природопользователей.

Анализ накопленных данных о состоянии окружающей среды, сведений о промышленном и туристическом потенциале архипелага Шпицберген позволяет подойти к решению этой задачи с использованием концепции Drivingforces - Pressure - State - Impact - Response (далее DPSIR) [6], объединив их в виде двух блоков: антропогенные факторы (Блок I) и климатические факторы (Блок II). Блок II представлен нагрузками, связанными с изменением климата. В свою очередь Блок I включает: промышленное освоение (угольная добыча), урбанизацию территории, туризм, транспорт.

При этом среди нагрузок могут быть рассмотрены:

- Выработка угля, отвалы горных выработок угля;
- Склады стройматериалов и оборудования;
- Неочищенные бытовые сточные воды и отходы;
- Застройка промышленная и бытовая;
- Заброшенные объекты хозяйственной и промышленной деятельности;
- Энерго- и водообеспечение;
- Развитие туристической инфраструктуры, строительство гостиниц, ресторанов;
- Увеличение числа туристических и грузовых судов, посещающих архипелаг.

Примерами цепочек «Движущие факторы -Нагрузки - Состояние - Воздействие - Реакция» могут быть для Блока II: «Изменение климата - Повышение среднесезонной температуры воздуха - Таяние вечной мерзлоты, эрозия почв - Опасность разрушения инфраструктурных построек, де-стабилизация горных склонов, выделение CO₂ и CH₄ - Развитие сети наблюдения за параметрами многолетней мерзлоты», а для Блока I: «Урбанизация - Неочищенные бытовые сточные воды и отходы - Повышение концентрации загрязняющих веществ - Увеличение вероятности загрязнения приморских территорий и вод прибрежной зоны синтетическими поверхностно-активными веществами - Разработка и усовершенствование методов очистки сточных вод и способов утилизации бытового мусора на архипелаг».

Для перехода к количественным оценкам необходимы индикаторы эколого-экономического состояния прибрежной зоны. Для оценки состояния архипелага Шпицберген экономическими и эколого-климатическими индикаторами могут быть для:

- промышленности: количество выработки угля (т/год), прибыль от горно-добывающей отрасли экономики на архипелаге (руб/год), численность вахтовых работников (тыс.человек), разведывательное бурение (км²) и др.;
- туристической отрасли: количество туристов, посещающих архипелаг (чел./год), количество людей, работающих в сфере туризма (чел./год), число судов, заходящий в порты архипелага в год и др.;
- водных ресурсов: поступление сточных вод промышленного характера (т/год), изменение уровня эвтрофикации, оцениваемое через индекс E-TRIX, объем стока рек в летний период года (тыс. м³), доля проб донных осадков, в которых концентрация тяжелых металлов превышает ПДК (%) и прочее;
- криосферы: скорость отступление ледников (м/год), площадь морского припая (км²) и др.;
- биоты: индексы видового разнообразия, доля видов, находящихся под угрозой, доля инвазивных видов от общего количества видов, численность и биомасса наиболее массовых видов и прочее.

Таким образом, анализ имеющихся данных с позиций DPSIR, позволил сформировать список возможных экономических и эколого-климатических индикаторов для архипелага Шпицберген для дальнейшей оценки потенциала его устойчивого развития.

Список литературы

- 1) Рыженков А.А. Проблемы делимитации и принципы управления прибрежными территориями Арктической зоны Российской Федерации // Вестник алтайской академии экономики и права №9. 2020. С. 62-75.
- 2) Третьяков М.В., Брызгалов В.А., Румянцева Е.В., Ромашова К.В. Пресноводные ресурсы Западного Шпицбергена в современных условиях (многолетние исследования ААНИИ). – СПб: Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 2021. 201 с.
- 3) Сайт Российской научной арктической экспедиции на архипелаге Шпицбергене. – URL: <http://rscs.aari.ru>. Дата обращения 10.04.2022
- 4) Kozak K., Polkowska Z., Ruman M., Koziol K., Analytical studies on the environmental state of the Svalbard archipelago – critical source of information about anthropogenic global impact // Trends in Analytical Chemistry № 50. 2013. P. 107–126
- 5) Сайт проекта «MOSJ» .- URL: <https://mosj.no/om-mosj>. Дата обращения 10.04.2022
- 6) Smeets E., Weterings R. Environmental Indicators: Typology and Overview // Technical Report No. 25; European Environment Agency: Copenhagen, Denmark, 1999. P. 19.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ МАРИКУЛЬТУРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОД ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ

Татаренко Ю.А.¹, Хаймина О.В.¹, Прокофьев П.А.¹, Родькин М.М.², Бугров Л.Ю.³

¹ Российский Государственный Гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

² ООО НИИ «Транснефть», г. Москва

³ ООО «Садко», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Чёрное море, Цемесская бухта, аквакультура, двустворчатые моллюски, качество вод, ИЗВ, индекс Маргалефа.

Цемесская бухта Черного моря – незамерзающая бухта на кавказском побережье Черного моря, акватория которой активно используется для организации грузового, военного и пассажирского судоходства. Расположение в прибрежной зоне жилого массива крупного населенного пункта - г. Новороссийск и ряда промышленных предприятий увеличивает риски негативного воздействия хозяйственной деятельности на качество вод и состояние экосистемы Цемесской бухты. Для контроля за экологическим состоянием акватории была реализована «Площадка биологических тест-объектов для мониторинга влияния объектов налива нефти/нефтепродуктов на состояние экосистем Цемесской бухты Черного моря».

Созданная площадка комплексной мультитрофической аквакультуры представляет собой стальные конструкции, которые крепятся на свайных опорах причала АО «Черномортранс-нефть». В качестве объектов аквакультуры культивировались двустворчатые моллюски - гигантская устрица *Crassostrea gigas* и мидия *Mytilus galloprovincialis*, а также водоросли - зеленая водоросль ульва жесткая *Ulva rigida* и бурая водоросль цистозира бородатая *Cystoseira barbata*. Выбранные гидробионты использовались как биоиндикаторы состояния биологических сообществ и водной среды в районе размещения производственных объектов нефтегазового сектора.

Наблюдения за объектами аквакультуры осуществлялись в весенний (17.06.21 и 07.06.22) и осенний (07.10.21 и 05.09.22) периоды. Комплекс исследований включал: водолазные работы по снятию кассет с садками для моллюсков, извлечение их из воды и подъемом на причал для последующего обследования и взятия проб для анализа культивируемых объектов. Дополнительно выполнялись работы по мониторингу с отбором гидрохимических и гидробиологических проб на исследуемой акватории Цемесской бухты в районе размещения причалов АО «Черномортранс-нефть» (Т1 - фоновая точка наблюдений и Т2 – контрольная точка в районе размещения площадки тест-объектов). В комплекс определяемых гидрохимических показателей входили: содержание растворенного кислорода, биохимическое потребление кислорода за 5 суток (БПК₅), концентрации взвешенных веществ, нефтепродуктов, азота нитритов и азота нитратов. Гидробиологические наблюдения включали отбор проб фито- и зоопланктона.

Для количественной оценки качества вод морской акваторий применялся индекс загрязненности вод (ИЗВ) [2]. Для расчета ИЗВ использовались БПК₅, концентрации (в мг/дм³) растворённого кислорода, взвешенных веществ и нефтепродуктов. ИЗВ оценивались для точек Т1 и Т2 по результатам гидрохимических наблюдений на трёх горизонтах (поверхность, средний горизонт (12 метров и 7 метров соответственно) и придонный горизонт (25 метров и 14 метров соответственно)). В соответствии с полученными значениями ИЗВ морские воды в рассматриваемых точках на акватории Цемесской бухты относятся к IV классу - «загрязненные воды». Это отличается от ранее сделанных оценок в рамках государственного мониторинга за 2015-2019 годы [2], классифицирующих воды как «чистые», но при учете иных показателей: концентрация нефтяных углеводородов, фосфатов, нитритного азота и кислорода.

Следует отметить, что на отдельных горизонтах в исследуемый период наблюдалось резкое увеличение концентрации взвешенных веществ. Максимальные концентрации в диапазоне 45-65

мг/дм³ были зафиксированы 07.06.22 и 07.10.21 при ПДК 10 мг/дм³. Одновременно на этих горизонтах в большинстве случаев наблюдалось превышение ПДК и по БПК₅ (свыше 2,1 мгО₂/дм³). Поэтому ИЗВ по горизонтам варьировало в диапазоне от 0,49 до 2,68, что соответствует II-V классам качества вод: «чистые», «умеренно загрязненные», «загрязненные» и «грязные» воды.

Общее состояние планктонного сообщества оценивалось с помощью индекса видового разнообразия Маргалефа [3]. В районе размещения площадки тест-объектов (точка Т2) значения индекса для фитопланктона составляли 1,66-2,64, а для зоопланктона – 1,21 -1,92. В то же время для фоновой точки (точка Т1) аналогичные индексы варьировали для фитопланктона в диапазоне 1,81-3,41, а для зоопланктона - 1,28-2,12. Поскольку выборки слишком малы, то количественно подтвердить значимость выявленных различий индексов видового разнообразия пока нельзя. Тем не менее, значения индекса Маргалефа для фоновой точки наблюдений свидетельствуют о несколько большем видовом разнообразии, чем в зоне размещения площадки тест-объектов.

В целом состояние культивируемых моллюсков на 2022 г. оценивалось как хорошее; в садках была обнаружена молодь мидий и устриц. Это свидетельствует о благоприятных условиях для развития данного сообщества. Доминирующими видами в районе площадки являлись морские и солоноватоводные виды диатомовых водорослей. Незначительная роль сине-зеленых водорослей (цианобактерий) указывала на отсутствие процессов, связанных с интенсивным загрязнением исследуемой акватории. Анализ тканей тест-объектов не выявил накопления в них загрязняющих веществ (в частности тяжелых металлов) свыше ПДК.

Таким образом, несмотря на выявленные превышения ПДК по содержанию взвешенных веществ и БПК₅, а также различия индексов видового разнообразия Маргалефа для контрольной и фоновой точек, состояние культивируемых тест-объектов свидетельствует о том, что модельная экосистема пока справляется с имеющейся нагрузкой. Подводя итог двухлетним исследованиям, можно сделать вывод о целесообразности размещения площадок аквакультурных тест-объектов для интегральной оценки состояния вод морских акваторий, подверженных интенсивному воздействию в результате хозяйственной деятельности.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка и реализация проекта плантации объектов аквакультуры в акватории Цемесской бухты Чёрного моря».

Список литературы

- 1) Шилин М.Б., Татаренко Ю.А., Прокофьев П.А. Мониторинг полигона аквакультуры в интересах контроля антропогенного пресса на полуизолированные акватории // Материалы XXIV ежегодного научного семинара «Чтения памяти К.М. Дерюгина», СПб: Изд. СПбГУ, 2023. С. 68-78.
- 2) Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2019. – Под ред. Корпенко А.Н., Москва: «Наука», 2020. С. 4-124.
- 3) Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д.. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. – Тольятти : ИЭВБ РАН, 2003. – С.190-193.

КАЧЕСТВЕННАЯ И КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА АЛИФАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ВОДЕ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

Ткаченко Ю.С.¹, Тихонова Е.А.¹, Бударова В.Ю.²

¹Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

²Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева, г. Астрахань

Ключевые слова: алифатические углеводороды, диагностические индексы, нефтяное загрязнение, морская вода, Карское море.

Карское море является одним из арктических морей России и относится к акватории Северного Ледовитого океана. По степени устойчивости к антропогенному загрязнению оно относится к неустойчивым, на него имеет сильное влияние речной сток, атмосферное и диффузное загрязнения с низкими показателями ассимиляционной емкости морской среды [1]. Естественные процессы разложения антропогенных углеводородов (УВ) замедлены в высокоширотных акваториях из-за широкого спектра природно-климатических условий. При низких температурах замедляется скорость испарения легких фракций нефти, снижается текучесть, за счет абсорбции на поверхности льда нефтяные УВ накапливаются в пористых наслоениях, каналах и пустотах ледового покрова, что может привести к необратимым последствиям [2].

В связи с активизацией добычи нефти и газа на арктическом шельфе исследование УВ в экосистеме арктических морей приобретает особую актуальность [3]. Нефть и нефтепродукты относятся к числу наиболее распространенных загрязняющих веществ морской среды. Учитывая, что основу нефтей составляют углеводороды, целесообразно проводить исследования по определению качественного и количественного состава алифатических углеводородов (АУВ) в морской воде. Также немаловажной задачей является идентификация вероятных источников их поступления в окружающую среду. Провести данный анализ позволяют расчёт и интерпретация различных диагностических индексов, указывающих на ту или иную природу происхождения АУВ.

Целью данной работы стало определение качественного и количественного состава АУВ морской воды северо-восточной части Карского моря, и идентификация вероятных источников их происхождения с помощью некоторых диагностических индексов.

В данной работе с целью дифференциации аллохтонного и автохтонного происхождения АУВ используют такие маркеры, как соотношение терригенного вещества к автохтонным соединениям (*terrigenous/ aquatic ratio, TAR*), отношение низкомолекулярных алканов к высокомолекулярным (*Low-molecular Weight to High-molecular Weight Homologies ratio, LWH/ HWH*), среднюю длину углеводородной цепи (*average chain length, ACL*). Для уточнения биогенной составляющей соединений используют отношение *n*-алканов, характерных для травянистой растительности к древесной (C_{31}/C_{29}), а для выявления нефтяного и биогенного происхождения АУВ используют индекс нечетности *CPI*, в частности CPI_2 , рассчитанный для высокомолекулярной части спектра [4].

Материалом для исследования послужили пробы воды, отобранные батометром с придонного и поверхностного горизонтов в рамках 50-го рейса НИС «Академик Борис Петров» летом 2022 г. на различных участках акватории северо-восточной части Карского моря. Глубина отбора проб с придонного горизонта варьировалась от 54 до 151 м. Всего было отобрано 16 проб с поверхностного горизонта и 5 проб с придонного. Пробоподготовка осуществлялась в соответствии с методикой [5].

Определение качественного и количественного состава АУВ производилось на базе НОЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ методом газовой хроматографии на газовом хроматографе «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором (ПИД).

Суммарная концентрация АУВ на разных участках акватории в придонном горизонте колебалась от 0,029 мг/л до 0,32 мг/л, в поверхностном — от 0,008 мг/л до 0,14 мг/л. В придонном слое концентрации АУВ выше, чем в поверхностном горизонте. Содержание АУВ в открытых поверхностных водах Карского моря в среднем 0,06 мг/л, что незначительно превышает ПДК для нефтяных УВ — 0,05 мг/л. А в придонном горизонте средняя концентрация АУВ составила 0,1 мг/л, что превышает ПДК в 2 раза. В поверхностном слое воды максимальная концентрация АУВ превышает ПДК в 3 раза, а в придонном — в 6 раз.

Рассчитанные диагностические индексы (в частности, индекс LWH/HWH во всех образцах был меньше 1) свидетельствуют о преимущественно терригенном происхождении АУВ как в поверхностной, так и в придонной воде северо-восточной части Карского моря. Источниками поступления последних могут являться крупные реки Обь и Енисей, впадающие в море и несущие большим потоком вод различные терригенные вещества [2]. Значение индекса $СРI_2$, являющегося основным критерием биогенности АУВ [2], при наличии нефтяного загрязнения приближается к 1. В придонном горизонте (в 80% проб) и в поверхностном горизонте (в 87% проб) индекс $СРI_2$ указывает на биогенное происхождение АУВ. Биогенными источниками поступления АУВ в морскую воду являются процессы жизнедеятельности и метаболизма морских организмов, которые сопровождаются биосинтезом [2]. В 20% проб придонной воды и в 13% проб поверхностной воды значение индекса $СРI_2$ приближалось к 1, что является показателем наличия АУВ нефтяного происхождения. Индекс АСЛ на всех исследуемых участках акватории был выше 0,5, что указывает на автохтонную природу АУВ.

В целом, можно заключить, что концентрации АУВ достаточно велики: превышение ПДК в придонной воде в 40% проб, в поверхностной — в 44%, но в соответствии с рассчитанными диагностическими индексами большинство АУВ имеют автохтонное и аллохтонное происхождение.

Благодарности. Пробы морской воды отобраны в рейсе в рамках программы «Плавающий университет» при поддержке Министерства науки и высшего образования. Лабораторные работы выполнены в рамках гос. задания ФИЦ ИнБЮМ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (№ 121031500515-8).

Список литературы

- 1) Диагностический анализ состояния окружающей среды арктической зоны Российской Федерации (расширенное резюме) // отв. ред. Б.А Моргунов. – М.: Научный мир, 2011. 200 с.
- 2) Немировская И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки) // отв. ред. А. П. Лисицын. – М.: Научный мир, 2013. 432 с.
- 3) Немировская И.А. Изменчивость концентраций и состава углеводородов во фронтальных зонах Карского моря // *Океанология* 55 (4). 2015. С. 552–562.
- 4) Soloveva O.V., Tikhonova E.A., Gurov K.I., Kotelyanets E.A. Hydrocarbons composition of sea bottom sediments (Balaklava Bay, Black Sea) // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2022. P. 101–117.
- 5) Другов Ю.С., Родин А.А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов: практическое руководство // Ю. С. Другов, А. А. Родин. – 3-е изд., – М.: Лаборатория знаний, 2020. 273 с.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА БИОПРОДУКТИВНОСТЬ ДОННЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ КРЫМА

Филиппова Т.А., Васечкина Е.Ф.

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: макроводоросли, морские травы, скорость роста, биогенные элементы, математическое моделирование.

Биопродуктивность морских фитоценозов зависит от множества факторов среды. Из наиболее значимых можно выделить: температуру воды, освещённость на глубине произрастания водорослей, концентрации биогенных элементов в воде. Целью данной работы является определить степень влияния различных внешних факторов на изменение биопродуктивности донных фитоценозов при помощи численного моделирования динамики роста макроводорослей и морских трав. Объектами исследования были выбраны 5 видов макроводорослей и 1 вид морской травы, часто встречающиеся в фитоценозах прибрежной зоны Крыма. Цистозира – многолетняя бурая водоросль, базифит фитоценозов, растущих на каменистом грунте. Ульва, кладофора, энтероморфа – зеленые водоросли, сопутствующие и эпифиты. Вертебрата – красная однолетняя водоросль, эпифит. Зостера – морская трава, многолетник, заросли играют ценозообразующую и структурную роль, поддерживая морские ландшафты [1].

Модель динамики роста макроводорослей и морских трав представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих изменение биомассы растений, внутреннее содержание биогенных элементов (азота и фосфора) под действием внутренних и внешних факторов. Управляющими параметрами модели являются температура воды, освещённость на поверхности моря, концентрации неорганических соединений в воде: аммония, нитратов и фосфатов [2]. Моделирование каждого вида растений выполнялось при помощи шестнадцати параметров, определяющих скорость фотосинтеза, интенсивность процессов изъятия нутриентов из среды, а также внутреннее содержание азота и фосфора в тканях растений. Численные значения указанных параметров были получены из различных литературных источников, наиболее полная таблица представлена в работах [2, 3].

В ходе численных экспериментов сравнивались приращения биомассы растений в наиболее продуктивный период вегетации (июль-август), при изменении внешних условий среды:

$\Delta B = (B_1 - B_0) / B_0$ где B_0 – биомасса растения в конечный момент при заданных параметрах среды, обеспечивающих стационарное состояние фитоценоза на сезонном масштабе (г/кв. м сут); B_1 – биомасса к концу интервала интегрирования при изменившихся условиях среды. Стационарное состояние определялось сезонным ходом температуры, освещённости и концентрации нутриентов, типичными для бухты Южной (Севастополь). Данные о сезонном ходе гидролого-гидрохимических характеристик среды были взяты в Банке океанографических данных Морского гидрофизического института РАН [4]. Значения сезонного хода освещённости поверхности моря представлено в работе [5]. В экспериментах при изменении одного из внешних условий другие оставались неизменными. Изучались изменения скоростей роста растений при кратном уменьшении и увеличении минеральных ресурсов, а также мутности воды, определяющей количество света, поступающее к кронам растений – базифитов на глубине 3 м.

Первый эксперимент был посвящён изучению реакции макрофитов на уменьшение количества ресурсов вдвое. При одновременном уменьшении концентраций азота и фосфора в воде максимальное снижение биомассы продемонстрировали зеленые водоросли (ульва –45 % и кладофора –43 %, в меньшей степени энтероморфа –24 %). При раздельном сокращении концентраций ресурсов, ульва показала свою зависимость от содержания азота в воде, а кладофора – от фосфора. Базифиты фитоценозов отреагировали слабее (–16 % цистозира и –8 % зостера), для цистозира

лимитирующим элементом оказался фосфор, для zostеры – азот. Снижение температуры воды вдвое привело к уменьшению биомассы растений, больше выраженному у кладофоры (–24 %). Уменьшение мутности воды ускорило рост растений, но незначительно (от 1 до 4 %).

Во втором эксперименте моделировалась ситуация увеличения концентраций неорганических соединений азота и фосфора (одновременно и в отдельности), а также общего взвешенного вещества вдвое. При одновременном увеличении концентраций биогенных элементов в воде скорость роста всех растений увеличилась, лидировали зеленые водоросли (ульва 80 %, кладофора 43 %, энтероморфа 33 %), остальные растения от 12 до 20 %. При отдельном увеличении резко выделяется ульва с 57 % роста при увеличении содержания неорганического азота в воде. Цистозира и кладофора более других растений реагируют на повышение содержания фосфатов (19 % увеличение биомассы). Вертебрата и zostера вообще не отреагировали на повышение уровня фосфатов в воде. Увеличение содержания общего взвешенного вещества в воде вдвое, значительно сокращающее поступление света к кроне растений, наиболее существенно повлияло на рост всех растений: цистозира –40 %, ульва –80 %, кладофора –78 %, энтероморфа –52 %, вертебрата –47 %, zostера –54 %.

В третьем эксперименте моделировалась ситуация кратного увеличения концентрации минеральных ресурсов в воде – от 3 до 10 раз. При увеличении содержания соединений азота в воде максимальные приращения скоростей фиксировались при 3-4-х кратном увеличении. Дальнейшее увеличение не влияло на скорость роста растений, за исключением zostеры, которая продолжила наращивать свою биомассу. По всей видимости, потребность zostеры в фосфоре достаточно низка, этот элемент не является лимитирующим. Аналогичная картина наблюдалась в эксперименте с увеличением фосфатов без изменений содержания азота, максимальный отклик фиксировался для цистозеры (29 %) и кладофоры (20 %). Такая реакция является следствием того, что при увеличении концентрации одного из элементов нарушается баланс между ними в тканях растения, один из элементов становится лимитирующим, соответственно водоросли не могут увеличивать интенсивность роста.

При одновременном повышении содержания биогенных элементов в воде интенсивность роста растений существенно увеличилась. При десятикратном увеличении количества минеральных ресурсов ульва продемонстрировала 7-кратное приращение биомассы, остальные растения за исключением красной водоросли вертебрата увеличили биомассу в 1,4 – 1,7 раза (вертебрата 56 %). Очевидно, что при таких приращениях скорости роста неизбежна структурная перестройка фитоценозов. При значительных выбросах биогенных элементов со сточными водами в мелководные бухты Севастополя с большой вероятностью может возникать ситуация цветения эпифитов и свободно плавающих макроводорослей. Сопровождающее эту ситуацию ухудшение освещенности в кронах будет оказывать угнетающее действие на растения – базифиты, что приведет к дальнейшему нарушению структуры фитоценозов.

Тема: FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»)

Список литературы

- 1) Milchakova N. Marine plants of the Black Sea. An illustrated field guide. – Sevastopol: Digit Print Press, 2011. – 144 pp.
- 2) Vasechkina E.F. and Filippova T.A. Modeling of the Biochemical Processes in the Benthic Phytocenosis of the Coastal Zone // Physical Oceanography. V. 26(1). 2019. P. 47-62.
- 3) Филиппова Т.А., Васечкина Е.Ф. Моделирование химико-биологических процессов роста морских трав // Морской гидрофизический журнал. Т. 38(6). 2022. С. 694–708.

- 4) Банк океанографических данных Морского гидрофизического института РАН: <http://bod-mhi.ru/ru/index.shtml> (интернет ресурс).
- 5) Финенко З.З., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М., Бастюрк О. Изменчивость фотосинтетических параметров фитопланктона в поверхностном слое Черного моря // Океанология. Т. 42(1). 2002. С. 60-75

ОЦЕНКА БИООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
ВОД БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ ОСЕНЬЮ 2022 Г. ПО ДАННЫМ
СУДОВОГО ПРОТОЧНОГО КОМПЛЕКСА

Аглова Е.А.^{1,2}, Глуховец Д.И.^{1,2}, Гольдин Ю.А.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

Ключевые слова: флуоресценция морской воды, хлорофилл *a*, растворенное органическое вещество, Баренцево море, Карское море.

Активное технологическое развитие Арктики и ярко выраженные проявления глобального потепления делают исследование данного региона актуальной научной задачей. Изучение пространственно-временных распределений биооптических характеристик морской воды позволяет оценивать влияние внешних факторов (речной сток, интенсивное кокколитофоридное цветение, уровень фотосинтетически активной радиации и др.) на значения исследуемых параметров. Цель данной работы - изучить пространственное распределение биооптических характеристик морской воды в Баренцевом и Карском морях и исследовать взаимосвязь полученных результатов.

С использованием судового проточного измерительного комплекса ИО РАН [1], в состав которого входит новый проточный спектральный 4-канальный флуориметр (ПФ-4), разработанный в 2022 г. в Лаборатории оптики океана, получены пространственные распределения биооптических характеристик вод поверхностного слоя Баренцева и Карского морей (1-й этап 89 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш»). Прибор предназначен для непрерывных измерений на ходу судна спектров флуоресценции пигментов фитопланктона и окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ), индуцированных излучением лазеров с длинами волн возбуждения 405 нм (фиолетовый), 450 нм (синий) и 520 нм (зеленый), а также светодиода с длиной волны 589 нм (оранжевый). Излучения фиолетовой и синей областей спектра используются для возбуждения флуоресценции ОРОВ и хлорофилла *a* (Хл); зеленой области - для исследования флуоресценции Хл; оранжевой - для обнаружения дополнительных пигментов фитопланктона (например, фикобилинов, в частности пигмента-маркера цианобактерий фикоцианина). В состав комплекса также входят проточный термосалинограф «Ocean Seven 314» для измерений удельной электропроводности и температуры воды и универсальный малогабаритный прозрачномер ПУМ-А для определения величины показателя ослабления света $c(530)$.

Успешно проведены первые натурные испытания нового проточного спектрального флуориметра. Их результаты находятся в полном согласии с данными проточного двухканального флуориметра [1], использовавшегося нами ранее [2-3]. Обои приборами зарегистрированы идентичные особенности (локальные минимумы и максимумы) как в пространственном распределении интенсивности флуоресценции Хл, так и ОРОВ. Важно подчеркнуть, что результаты, получаемые с помощью нового прибора, не требуют калибровки по данным спектральных измерений, выполняемых на пробах морской воды [4]. Это существенно облегчает и ускоряет процесс обработки результатов измерений. Кроме того, спектральный подход позволяет непосредственно избавиться от «подставки» флуоресцентного сигнала в канале Хл, сформированного ОРОВ.

На основании анализа судовых проточных данных получены следующие результаты:

- зарегистрированы проявления затухающего кокколитофоридного цветения в баренцевоморской части маршрута (область около 46° в.д.), подтверждающиеся повышенными значениями интенсивности флуоресценции Хл и показателя ослабления морской воды $c(530)$;

- показано, что наклон отрицательной связи между значениями солености и значениями интенсивности флуоресценции ОРОВ, полученными на протяжении всего рейса, имеет изменчивость. При этом разным наклонам соответствует разная температура поверхностного слоя вод;
- получена зависимость значений показателя поглощения ОРОВ a_g , измеренных на интегрирующей сфере ICAM [5], от значений флуоресценции ОРОВ по измерениям судового проточного комплекса с осреднением ± 1 км с коэффициентом корреляции $R = 0.92$. Такая зависимость позволяет рассчитывать пространственное распределение a_g вдоль маршрута судна, что позволит получить существенно больше данных для валидации результатов работы региональных биооптических алгоритмов [6];
- получена зависимость значений концентрации Хл, полученных по данным прямых определений, от интенсивности флуоресценции Хл по данным ПФ-4 с коэффициентом корреляции $R = 0.71$.

Судовые измерения выполнены в рамках государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2021-0001, обработка данных – по проекту РНФ № 21-77-10059. Грант предоставлен через Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Список литературы

- 1) Гольдин Ю.А., Глуховец Д.И., Гуреев Б.А., Григорьев А.В., Артемьев В.А. Судовой проточный комплекс для измерения биооптических и гидрологических характеристик морской воды // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 814–822.
- 2) Аглова Е.А., Глуховец Д.И. Примеры влияния динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции хлорофилла а в поверхностном слое Баренцева и Норвежского морей // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15. № 4. С. 54–62.
- 3) Glukhovets D.I., Goldin Yu.A. Surface layer desalination of the bays on the east coast of Novaya Zemlya identified by shipboard and satellite data // Oceanologia. 2019. Vol. 61. № 1. P. 68–77.
- 4) Глуховец Д.И., Гольдин Ю.А., Гуреев Б.А. Калибровка проточного флуориметра ПФД-2 // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2019). Материалы XVI всероссийской научно-технической конференции. Том II. – М.: ИД Академии Жуковского, 2019. С. 45–49.
- 5) Погосян С.И., Дургарян А.М., Конюхов И.В., Чикунова О.Б., Мерзляк М.Н. Абсорбционная спектроскопия микроводорослей, цианобактерий и растворенного органического вещества: измерения во внутренней полости интегрирующей сферы // Океанология. № 6(49). 2009. С. 934–939.
- 6) Glukhovets D., Sheberstov S., Vazyulya S., Yushmanova A., Salyuk P., Sahling I., Aglova E. Influence of the Accuracy of Chlorophyll-Retrieval Algorithms on the Estimation of Solar Radiation Absorbed in the Barents Sea // Remote Sensing. 2022. Vol. 14. № 19. 4995.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА В ВОДАХ АЗОВСКОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Василенко Н.В., Кубряков А.А., Алескерова А.А., Станичный С.В., Медведева А.В.

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: Азовское море, взвешенное вещество, спутниковые изображения, MODIS.

Азовское море является мелководным бассейном внутреннего типа, средние глубины которого составляют 7 м, максимальная – 14,4 м в центральной части акватории [1]. При высоких значениях скорости ветра происходит интенсивное перемешивание вод до дна, что приводит к взмучиванию донных отложений, а также эрозионным процессам берегов. В результате воды Азовского моря содержат большое количество взвешенного вещества, из-за чего для них характерна низкая прозрачность [2]. Кроме того, на мутность вод существенное влияние оказывает сток реки Дон, несущий в себе большое количество терригенного материала [3].

Цель – исследовать воздействие ветра на взмучивание донных отложений Азовского моря и проявление взвешенного вещества по спутниковым данным среднего и высокого разрешения.

В настоящей работе на основе анализа спутниковых данных среднего разрешения MODIS Aqua, MODIS Terra о яркости восходящего излучения и высокого разрешения MSI Sentinel-2, OLI Landsat-8 было выявлено, что в центральной части Азовского моря наиболее часто чистые от взвешенного вещества воды наблюдаются с мая по сентябрь (максимум в августе). В то же время, воды Таганрогского залива регулярно в течение года содержат большое количество взвешенного вещества.

Для оценки ветрового воздействия привлекались данные на основе оперативного продукта NCEP с 6- часовой дискретностью. При рассмотрении ежесуточных спутниковых данных было обнаружено, что при кратковременном воздействии умеренного ветра до 7 м/с наблюдается взмучивание вод в районе косы Бердянской, косы Обиточной и Ясенском заливе, при этом воды основной части Азовского моря (исключая Таганрогский залив) остаются относительно чистыми от взвешенного вещества. Эти районы также соответствуют мелководным зонам с глубинами до 5 м, донные отложения которых представляют собой алевритово-илистый, средне-мелкозернистый песок и смешанный тип осадка [4].

Анализ спутниковых данных показал, что под воздействием ветров со значениями скорости более 10 м/с воды всей акватории Азовского подвергаются взмучиванию за 1-2 суток. Так, по данным MODIS Aqua значения яркости восходящего излучения на длине волны 551 нм для вод Азовского моря с большим содержанием взвешенного вещества в штормовых условиях могут достигать более 2,5 Вт/м²·стер·мкм для всей поверхности акватории.

По спутниковым данным оценено время седиментации взвешенного вещества в водах после взмучивания в результате штормового ветра. Было выявлено, что при снижении скорости ветра до значений менее 5 м/с, взвешенное вещество в центральной части Азовского моря в среднем осаждается за 3-4 суток.

Исследование изменений гидрооптических свойств вод Азовского моря выполнялось при поддержке гранта РФФ 23-27-00421. Обработка и анализ спутниковых данных выполнялся в рамках Госзадания FNNN-2021-0003.

Список литературы

- 1) Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 1. Азовское море / Ю.П. Ильин [и др]. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – 401 с.

- 2) Кушнир В. М. Оценка характеристик взвешенных наносов по данным оптических сканеров // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2008. – №. 16. – С. 224-235.
- 3) Сорокина В. В., Бердников С. В. Математическое моделирование терригенного осадконакопления в Азовском море // Океанология. – 2008. – Т. 48. – №. 3. – С. 456-466.
- 4) Матишов Г.Г. Сейсмопрофилирование и картирование новейших отложений дна Азовского моря // Вестник Южного научного центра. 2007. Т. 3. № 3. С. 32–40.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРООПТИЧЕСКИХ РАБОТ, ВЫПОЛНЕННЫХ В БАРЕНЦЕВОМ И КАРСКОМ МОРЯХ В СЕНТЯБРЕ 2022 Г.

Глуховец Д.И.^{1,2}, Аглова Е.А.^{1,2}, Артемьев В.А.¹, Глитко О.В.¹, Глухов В.А.¹,
Дерягин Д.Н.^{1,2}, Клименко С.К.¹, Павлова М.А.^{1,2}, Салинг И.В.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Московский физико-технический институт, г. Москва

Ключевые слова: биооптические характеристики морской воды, флуоресценция морской воды, кокколитофоридные цветения, характеристики световых полей, проточный измерительный комплекс, лидарное зондирование, Баренцево море, Карское море.

Доклад посвящен результатам гидрооптических работ, полученным в 1-м этапе 89-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Баренцевом и Карском морях в сентябре 2022 г. Основная задача этих работ - долговременные исследования пространственно-временной изменчивости распределений биооптических характеристик морской воды для выявления климатических и меж-годовых изменений [1]. Для решения этой задачи проведены зондирования на станциях и отбор проб воды для лабораторных определений. Непрерывно регистрировались значения облученности сверху на уровне поверхности моря. В Карском море выполнены два сеанса подсамолетных измерений с использованием УНУ «Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик»».

На ходу судна выполнена непрерывная регистрация характеристик поверхностного слоя морской воды с помощью проточного измерительного комплекса [2]. Полученные данные проточного измерительного комплекса позволяют разделить по наклону связей солёности и интенсивности флуоресценции окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ), а также данным о температуре поверхностного слоя вклады различных источников в сигнал флуоресценции ОРОВ [3]. Показано наличие лавинной седиментации на выходе из пролива Югорский Шар. При этом растворенное окрашенное вещество распространяется в Баренцево море более чем на 20 морских миль.

Лидарное зондирование верхнего слоя морской воды проводилось как на станциях, так и на ходу судна. Произведена верификация сигналов поляризованного лидарного зондирования вод Карского и Баренцева морей на всех станциях с данными вертикальных профилей распределения температуры, плотности, солёности, интенсивности флуоресценции хлорофилла *a*, показателя ослабления света морской водой. Данные лидарного зондирования позволили зарегистрировать [4] в Карских воротах внутреннюю волну с периодом 4-8 минут на глубине 11-13 м.

Изготовлен и испытан макет современного палубного спектрометра [5], показано хорошее согласие с данными плавающего спектрометра, имеющего абсолютные радиометрические калибровки каналов яркости и облученности.

Выполнены разрезы в областях затухающего кокколитофоридного цветения, определенных по полученным в рейсе данным спутниковых сканеров цвета в южной части Баренцева моря [6]. Согласно оценкам концентрации клеток, выполненным по данным непрерывных измерений показателя ослабления света морской водой в поверхностном слое, концентрация изменилась с ~3 млн кл./л (6 сентября 2022 г.) до ~1.5 млн кл./л (16 сентября 2022 г.), что согласуется с данными спутниковых оценок.

Данные судовых измерений получены в рамках государственного задания ИО РАН по теме №FMWE-2021-0001. Обработка данных проводилась при поддержке проекта РФФ № 21-77-10059.

Список литературы

- 1) Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Володин В.Д., Глуховец Д.И., Дубинина Е.О., Круглинский И.А., Кудрявцева Е.А., Матуль А.Г., Новичкова Е.А., Политова Н.В., Саввичев А.С., Силкин В.А., Стародымова Д.П. Системные исследования осадкообразования в европейской Арктике в 84-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” // Океанология. 2022 Т. 62. № 4. С. 660-663.
- 2) Гольдин Ю.А., Глуховец Д.И., Гуреев Б.А., Григорьев А.В., Артемьев В.А. Судовой проточный комплекс для измерения биооптических и гидрологических характеристик морской воды // Океанология. 2020. Т. 60. № 5. С. 814–822.
- 3) Аглова Е.А., Глуховец Д.И., Гольдин Ю.А. Оценка биооптических характеристик поверхностных вод Баренцева и Карского морей осенью 2022 г. // Текущий сборник.
- 4) Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А. Лидарный метод регистрации внутренних волн в водах с двухслойной стратификацией гидрооптических характеристик // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14. №. 3. С. 86–97.
- 5) Павлова М.А., Глуховец Д.И. Анализ данных о коэффициенте яркости моря и биооптических характеристиках, измеренных контактными и дистанционными методами в Карском море осенью 2022 г. // Текущий сборник.
- 6) Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Каралли П.Г., Юшманова А.В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998-2017 гг. // Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН. Ответственный редактор д.ф.-м.н. О.В. Копелевич. Москва, 2018. – 140 с. https://optics.ocean.ru/Atlas_2019/8_Monography_2018.pdf.

ОПТИЧЕСКИЕ И МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРОПОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ НАД АРКТИЧЕСКИМИ МОРЯМИ ПО ДАНЫМ ИЗМЕРЕНИЙ С БОРТА САМОЛЕТА-ЛАБОРАТОРИИ в 2020 и 2022гг.

Зенкова П.Н., Чернов Д.Г., Аршинов М.Ю., Круглинский И.А.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

Ключевые слова: аэрозоль, черный углерод, Арктика, вертикальный профиль, самолет-лаборатория, аэрозольная оптическая толщина, альbedo однократного рассеяния.

Арктика является самым уязвимым регионом земного шара, столкнувшимся с глобальным потеплением и связанными с ним изменениями окружающей среды. Недавние исследования [1] указывают на то, что за последние 43 года Арктика нагревалась почти в 4 раза быстрее, чем в среднем весь земной шар. Данный процесс именуется в настоящее время арктическим усилением (АУ). Одним из множества факторов, обосновывающих причины АУ, является атмосферный аэрозоль [1]. За последнее десятилетие заметно возросло число работ, посвященных исследованию свойств аэрозоля в Арктическом регионе [1-5]. Но в этих исследованиях остаются невыясненными процессы газоаэрозольного обмена между водной поверхностью и атмосферой. Отсутствующая или скудная информация о вертикальных распределениях газовых и аэрозольных составляющих атмосферы затрудняет моделирование климатических процессов и значительно усложняет прогноз изменений окружающей среды. Для восполнения этих данных используются наблюдения, выполняемые на борту самолета – лаборатории [5]. В сентябре 2020г. и 2022 г. на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» проводились комплексные исследования газового и аэрозольного состава тропосферы над морями Северного Ледовитого Океана (СЛО) [5]. Также нами в 2022г. были успешно проведены синхронные измерения микрофизических и оптических свойств аэрозоля с борта НИС «Академик Мстислав Келдыш» и с борта самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик». Аэрозольный комплекс на борту самолета-лаборатории состоял из аэталометра МДА-02, разработки ИОА СО РАН, измеряющего массовую концентрацию поглощающего вещества M_{eBC} (Черный углерод, «сажа»), нефелометра ФАН-М, регистрирующего коэффициент направленного рассеяния «сухой основы» субмикронных частиц $\mu_d(\lambda = 0.53 \text{ мкм}, \phi = 45^\circ)$ на длине волны $\lambda = 0.53 \text{ мкм}$, автоматической диффузионной батареи и спектрометра Grimm [5], получающие счетные концентрации частиц. Эмпирическая оценка массовой концентрации субмикронного аэрозоля M_A осуществлялась по формуле $M_A = 2.4 * \mu_d(\lambda = 0.53 \text{ мкм}, \phi = 45^\circ)$, для плотности частиц 1.5 г/см^3 . На борту НИС «Академик Мстислав Келдыш» располагались аэталометр и спектрометр Grimm [3]. По данным, полученным над морями СЛО в 2020г, отчетливо прослеживается тенденция снижения массовых концентраций субмикронного аэрозоля M_A и поглощающего вещества M_{eBC} при движении с запада на восток, и их рост при перелетах в обратном направлении. В сентябре 2020 г наибольшее содержание аэрозоля наблюдалось в Баренцевом и Карском морях, где до 5 км регистрировались максимальные M_A . Высокие значения M_{eBC} отмечены в Баренцевом море ($0.38 \pm 0.86 \text{ мкг/м}^3$), а также в Чукотском море ($0.24 \pm 0.11 \text{ мкг/м}^3$), минимальные – в море Лаптевых. В Чукотском море был зарегистрирован инверсный характер вертикального профиля M_{eBC} . Вертикальные распределения массовой концентрации аэрозоля и поглощающего вещества, полученные в сентябре 2022г. над Карским морем, неоднородны и на разных высотах сформированы разными воздушными массами. Отметим, что массовые концентрации поглощающего вещества, зарегистрированные в 2022г., на порядок ниже значений, полученных в 2020г. На основе полученных данных о $\mu_d(\lambda = 0.53 \text{ мкм}, \phi = 45^\circ)$, M_{eBC} , распределения частиц по размерам проведена оценка оптические характеристики аэрозоля (спектральный ход аэрозольной оптической толщи (АОТ), альbedo однократного рассеяния, среднего косинуса) в видимом диапазоне длин волн в 9

километровом слое тропосферы над морями Российского сектора Арктики. Схема восстановления оптических характеристик аэрозоля подробно описана в работе [6].

Зондирование атмосферы выполнено на УНУ самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик», созданного в рамках госзадания ИОА СО РАН. Обработка данных и анализ результатов проведено по проекту Минобрнауки РФ «Исследование антропогенных и естественных факторов изменений состава воздуха и объектов окружающей среды в Сибири и Российском секторе Арктики в условиях быстрых изменений климата с использованием УНУ «Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик»», соглашение № 075-15-2021-934.

Список литературы

- 1) Rantanen M., Karpechko A. Yu., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T. & Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // Nature Communications Earth & Environment V.3(1). 2022. P.168-178.
- 2) The current state of the natural environment on Spitzbergen archipelago multi-authored monograph: To the 100th anniversary of the Arctic and Antarctic Research Institute / under the general editorship of L.M. Savatyugin. – Saint Petersburg : Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 2021. – 302 p.
- 3) Sakerin S.M., Kabanov D.M., Makarov V.I., Pol'kin, V.V., Popova S.A., Chankina O.V., Pochufarov A.O., Radionov V.F., Rize D.D. Spatial Distribution of Atmospheric Aerosol Physicochemical Characteristics in the Russian Sector of the Arctic Ocean // Atmosphere V.11(11). 2020. P.1170-1192.
- 4) Popovicheva O. B., Evangelidou N., Kobelev V. O., Chichaeva M. A., Eleftheriadis K., Gregorič A., and Kasimov N. S. Siberian Arctic black carbon: gas flaring and wildfire impact // Atmos. Chem. Phys. V.22. 2022. P.5983–6000.
- 5) Belan B. D., Ancellet G., Andreeva I. S., Antokhin P. N., Arshinova V. G., Arshinov M. Y., Balin Y. S., Barsuk V. E., Belan S. B., Chernov D. G., Davydov D. K., Fofonov A. V., Ivlev G. A., Kotel'nikov S. N., Kozlov A. S., Kozlov A. V., Law K., Mikhail'chishin A. V., Moseikin I. A., Nasonov S. V., Nédélec P., Okhlopko O. V., Ol'kin S. E., Panchenko M. V., Paris J.-D., Penner I. E., Ptashnik I. V., Rasskazchikova T. M., Reznikova I. K., Romanovskii O. A., Safatov A. S., Savkin D. E., Simonenkov D. V., Sklyadneva T. K., Tolmachev G. N., Yakovlev S. V. and Zenkova P. N. Integrated airborne investigation of the air composition over the Russian sector of the Arctic // Atmos. Meas. Tech. V.15. 2022. P.3941–3967.
- 6) Зенкова П. Н., Терпугова С. А., Польшкин В. В., Польшкин Вас.. В., Ужегов В. Н., Козлов В. С., Яужева Е. П., Панченко М. В. Развитие эмпирической модели оптических характеристик аэрозоля Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. Т. 34(03). 2021. С.192–198.

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ БИООПТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИБРЕЖНЫХ ВОД КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА (ЛЕТО 2022 ГОД)

Калмыкова Д.В., Чурилова Т.Я., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А., Скороход Е.Ю.

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: поглощение света, пигменты фитопланктона, органическое окрашенное взвешенное вещество, взвешенное вещество, Черное море.

В водных экосистемах прибрежные воды испытывают сильные антропогенные нагрузки, что может приводить к заметным негативным изменениям в прибрежных водах, в частности к резкому увеличению биомассы фитопланктона, которое сопровождается развитием гипоксии и заморных явлений. Черноморская экосистема подвержена влиянию выноса удобрений и гербицидов с береговым стоком и сбросом воды из водохранилищ, а также воздействию промышленного и бытового сброса, нефтяного загрязнения [1]. Исходя из этого, исследования состояния водной среды на основе показателей качества и продуктивности вод становятся все более актуальными.

Цель работы заключается в исследовании вертикального распределения концентрации хлорофилла a , спектральных показателей поглощения света всеми оптически активными компонентами среды, соотношения между ними в прибрежных водах Черного моря в районе Севастополя.

На основе данных биооптического мониторинга, проведенного в июле 2022 года, в поверхностном слое Черного моря на станции, расположенной напротив бухты Севастопольской на расстоянии двух миль от берега проведена оценка концентрации хлорофилла a (Chl- a), спектральных показателей поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$), неживым взвешенным веществом ($a_{NAP}(\lambda)$), окрашенным растворенным органическим веществом ($a_{CDOM}(\lambda)$), а также оценка удельной эффективности поглощения света пигментами фитопланктона (a_{ph}^*) на разных глубинах в слое от 0 до 12 м.

Прибрежные воды характеризовались вертикальной изменчивостью исследованных биооптических показателей вод. Значения Chl- a увеличивались с глубиной от 1,64 мгм⁻³ на 0 м до 1,81 мгм⁻³ на 12 м, значения $a_{CDOM}(440)$ находились в диапазоне от 0,072 до 0,134 м⁻¹, значения $a_{NAP}(440)$ варьировались от 0,095 м⁻¹ на 3 м до 0,057 м⁻¹ на глубине 9 м. Значения $a_{ph}(440)$ варьировались от 0,109 до 0,075 м⁻¹. Удельное поглощение ($a_{ph}^*(\lambda)$) в красном (на длине волны 678 нм) и синем (на 440 нм) максимумах на 0 м составляло 0,023 и 0,059 м²/мг⁻¹ соответственно. Далее с увеличением глубины наблюдалось уменьшение удельного поглощения до 0,023 м²/мг⁻¹ в красном максимуме и до 0,051 м²/мг⁻¹ в синем максимуме на глубине 6 м. Увеличение удельного поглощения в синем максимуме (440 нм) до 0,060 м²/мг⁻¹ наблюдалось на глубине 9 м, при этом значение в красном максимуме составляло 0,022 м²/мг⁻¹. С увеличением глубины до 12 м значения показателей уменьшились до 0,050 м²/мг⁻¹ на длине волны 440 нм и 0,021 м²/мг⁻¹ на длине волны 678 нм. С помощью погружного спектрометра проводили измерения спектрального солнечного квантового излучения, проникающего в водную толщу. Это позволило оценить способность фитопланктона поглощать свет определенного спектрального состава. Величина удельной эффективности поглощения света пигментами фитопланктона a_{ph}^* , учитывающая спектральные свойства не только показателя поглощения света фитопланктоном, но и проникающего излучения, изменялась в пределах освещенного слоя от 0,026 до 0,019 м²/мг⁻¹, в среднем составляя $0,023 \pm 0,003$ м²/мг⁻¹. Самое высокое значение (0,026 м²/мг⁻¹) наблюдалось на глубине 9 м. В то время как самое низкое значение удельной эффективности поглощения света пигментами фитопланктона a_{ph}^* , выявили в нижней части исследуемого слоя на глубине 12 м (0,019 м²/мг⁻¹).

Получены новые данные о вертикальном распределении концентрации хлорофилла a и спектральных показателей поглощения света оптически активными компонентами среды в период

летней стратификации вод Черного моря.

Исследование выполнено по теме ГЗ № 121040100327-3.

Список литературы

- 1) Виноградов М.Е., Флинт М.В. Основные направления исследования экосистемы открытых районов Черного моря в 7-м и 8-м рейсах НИС "Рифт". - Москва : Наука, 1989. – С. 3 – 9.

ВЛИЯНИЕ МЕЗОМАСШТАБНОЙ ДИНАМИКИ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ NEMO-BFM И ДАННЫМ БУЕВ АРГО

Кубряков А.А., Лишаев П.Н., Кубрякова Е.А., Мизюк А.И.

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: синоптические вихри, Био-Арго, физико-биохимическое моделирование, концентрация хлорофилла А, фитопланктон.

Мезомасштабная динамика значительно влияет на протекание различных биохимических процессов в морской среде, поскольку модулируют адвективные и турбулентные потоки биогенных веществ, условия освещенности в верхнем слое. В настоящей работе по данным результатов численного биохимического моделирования NEMO-BFM за 2008-2010 гг и массива буев Био-Арго за 2014-2022 гг, а также на основе методов автоматической идентификации вихрей исследовано влияние синоптических вихрей и интенсивного ветрового воздействия (по данным реанализов NCEP, ERA-5) на биологические характеристики Черного моря в верхнем 0-100 метровом слое.

На основе данных численного моделирования NEMO-BFM с разрешением 10 км и процедуры трехмерной идентификации в вихрях исследованы особенности распределения основных биогенных элементов (нитратов, ионов аммония, фосфатов) в вихрях, а также влияние вихрей на изменчивость биомассы различных групп фитопланктона (мелких и крупных диатомовых, кокколитофорид). По данным измерений буев Арго (полученных с портала Ifremer) исследованы особенности вертикального распределения концентрации хлорофилла "а" (Хл), показателя обратного рассеяния и характеристик освещенности (фотосинтетически активная радиация) в вихрях различного знака.

Предложены и описаны основные механизмы влияния вихрей (вертикальные движения, кросс-шельфовый перенос, усиление вертикального перемешивания в вихрях (Микаэлян и др., 2020; McGillicuddy et al., 2016) и интенсивного ветрового воздействия на биологические характеристики Черного моря, их пространственные и сезонные особенности.

В антициклонах (АВ) отмечается снижение Хл и рост прозрачности в поверхностном слое (0-20м) и в нижней части эвфотической зоны, а в слое 30-40 м фиксируется рост. При увеличении скорости АВ область отрицательных аномалий в верхнем слое заглубляется. Толщина относительно бедных вод расширяется от 0-20 м, до 0-35 м. Кроме этого, растет отрицательная аномалия концентрации хлорофилла "а" от -0.1-0.2 мг/м³ для самых слабых вихрей до -0.3..-0.4 мг/м³ для интенсивных АВ. Важной причиной расширения подповерхностного максимума концентрации хлорофилла "а" в антициклонах является адвекция вод шельфа, где продуктивный слой располагается ближе к поверхности. В циклонах (ЦВ) наблюдается более сложная структура аномалии Хл с ростом на глубинах 20-25 м и 35-45 м, т.е. на глубине термоклина и нижней эвфотической зоны. Из-за этого в ЦВ часто встречаются профили с двумя и более подповерхностными максимумами хлорофилла А. На основе полученных данных впервые выявлены особенности влияния вихрей на изменчивость биооптических параметров в различные сезоны года. Эти особенности во многом связаны с гомогенизацией верхнего слоя и исчезновения подповерхностного максимума хлорофилла в холодный период из-за зимнего перемешивания.

Анализ данных Био-Арго показывает, что значения показателя обратного рассеяния (b_{bp}) в вихрях в целом выше, чем вне их. Максимальные значения наблюдаются в верхней части антициклонов в слое 0-10 м, где значения b_{bp} выше на 0,001 или на 20%, чем вне вихрей. В то же время в нижней части АВ (15-40 м) наблюдаются отрицательные аномалии b_{bp} , что вероятно связано со снижением концентрации фитопланктона из-за малого количества биогенов. В отличие от этого

в ЦВ повышенные концентрации b_{bp} отмечаются во всем 0-60 м слое. Однако, в верхнем слое аномалии b_{bp} в ЦВ в 2 раза меньше ($5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$), чем в АВ в слое 0-10 м. Наибольший вклад в увеличении b_{bp} в вихрях дает весенне-летний сезон (май-июль), время интенсивного летнего цветения кокколитофорид. Кроме этого высокие положительные значения аномалии наблюдаются в декабре-января, когда в Черном море отмечаются зимние цветения кокколитофорид. Таким образом, влияние вихрей на b_{bp} , заключается, в первую очередь, в изменении динамику цветения этого типа фитопланктона. В начале летнего цветения - в мае, в областях подъема, в циклонах наблюдается наиболее высокие значения b_{bp} . В антициклонах цветение наоборот подавлено и аномалии отрицательны, но в июне наиболее высокие значения b_{bp} соответствующие максимальным концентрациям кокколитофорид. Таким образом в ЦВ наблюдается более ранее интенсивное цветение кокколитофорид, а в АВ наблюдается его задержка на месяц, что также фиксируется и по спутниковым данным.

Идентификация и определение характеристик вихрей выполнена при поддержке гранта РФФ 21-77-10052, исследование влияния вихрей на характеристик фитопланктона выполнено при поддержке гранта РФФ 20-17-00167, численное моделирование выполнено при поддержке Госзадания FNNN-2021-0007.

Список литературы

- 1) McGillicuddy Jr D.J. Mechanisms of physical-biological-biogeochemical interaction at the oceanic mesoscale // Annual Review of Marine Science. 2016. V. 8. P. 125-159.
- 2) Микаэлян А.С., Зацепин А.Г., Кубряков А.А. Воздействие мезомасштабной вихревой динамики на биопродуктивность морских экосистем (обзор) // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. №. 6 (216). С. 646-675.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ АЛГОРИТМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЧИСТОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ПЛАНКТОНА (СООБЩЕСТВА) В ВОДАХ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Кузьмина С.К., Лобанова П.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: первичная продукция, чистая первичная продукция сообщества, алгоритмы восстановления ЧПС, Атлантический океан, изменчивость входных параметров алгоритма.

Чистая первичная продукция планктона (сообщества) (ЧПС) – это разница между валовым фотосинтезом и дыханием всего сообщества, включая автотрофные (фитопланктон) и гетеротрофные (зоопланктон, бактерии) организмы [1]. Исследование ЧПС позволяет связать геохимический и биологический циклы Мирового океана – тем самым описать как биологическую продуктивность сообщества, так и углеродный цикл океана [2, 3].

Один из подходов к моделированию ЧПС – это создание алгоритмов на основе *in situ* данных ЧПС и чистой первичной продукции фитопланктона (ПП). ПП, в свою очередь, – это разница между валовым фотосинтезом и дыханием только автотрофной части сообщества [1].

При измерении ЧПС и ПП методом тёмных и светлых склянок, используют три подхода, тем самым получая среднее значение параметров и их среднеквадратическое отклонение (СКО). Такой способ даёт возможность учесть их изменчивость в среде. Однако СКО параметров ранее не учитывалось при моделировании ЧПС.

Предыдущие исследования [4] показали, что существующие алгоритмы восстановления ЧПС, основанные на степенной функции ЧПС от ПП (алгоритмы А, В и С: $ЧПС = aПП^b$, где a, b – эмпирические коэффициенты) и от ПП и температуры поверхности океана (ТПО) одновременно (алгоритм D: $ЧПС = aПП^{ТПО^{b+d}}$, где a, b, d – эмпирические коэффициенты) [5] показывают более точные результаты, при учете изменчивости указанных параметров друг относительно друга.

В данной работе исследована зависимость ЧПС от ПП с учетом изменчивости обоих параметров в среде (т.е. с учётом их СКО). *In situ* данные ЧПС и ПП предоставлены Плимутской морской лабораторией (<https://rsg.pml.ac.uk>) и получены в рейсах Atlantic Meridian Transect в период 1998 - 2019 гг. в основном в период с мая по ноябрь.

Результаты исследования показали, что использование порогового значения *in situ* СКО (в нашем случае, трехкратное значение СКО для ряда *in situ* значений ЧПС и ПП) для определения ошибочных значений результатов моделирования (выбросов), хотя и является более трудоемким способом, но совершенствует понимание физического смысла выброса для алгоритмов. При этом, при использовании данного метода, общая картина результатов моделирования остается одинаковой: алгоритм А, разработанный для гетеротрофных вод, сильнее всего недооценивает *in situ* значения на автотрофных станциях, где значение восстановленной ЧПС практически в два раза меньше *in situ* величин; на гетеротрофных станциях алгоритмы В, С и D наоборот переоценивают значения ЧПС на более чем $100 \text{ ммоль } O_2 \text{ м}^{-2} \text{ день}^{-1}$. Это объясняется тем, что алгоритмы зависят от условий, в которых проводились измерения параметров для тестовой выборки, и в «новых» условиях показывают худшие результаты. Однако точность алгоритмов меняется: без учета СКО *in situ* ЧПС и ПП самая высокая связь *in situ* и модельных значений наблюдается для алгоритма В ($r = 0.67$, p -уровень < 0.01 , абсолютная процентная ошибка (АПО) = 1.34), при учете изменчивости *in situ* параметров, алгоритм D показывает более высокую точность ($r = 0.46$, p -уровень < 0.01 , АПО = 2.15).

Анализ результатов работы алгоритмов с применением вышеупомянутого метода оценки выбросов, показал, что, чем больше изменчивость параметра в среде, тем больше систематическая

ошибка (bias) алгоритмов. Связь ошибок алгоритмов с СКО *in situ* значения ЧПС на станции больше ($r = 0.38$, p -уровень < 0.01), чем для СКО *in situ* ПП ($r = 0.29$, p -уровень < 0.05).

Поскольку в дальнейшем планируется разработка нового алгоритма восстановления ЧПС с учётом СКО входных параметров, в данной работе оценена новая (тестовая) выборка для различных акваторий Атлантического океана, полученная с учетом пяти пар значений ЧПС и ПП для каждой станции: одна пара средних значений и четыре пары возможных значений параметров с учётом их СКО. В результате, форма облака значений тестовой выборки значительно трансформируется при учёте изменчивости *in situ* величин параметров; алгоритмы А, В, С, D хуже описывают форму нового ряда параметров.

Таким образом, в результате работы описана зависимость алгоритмов восстановления ЧПС от изменчивости их входных параметров, связанной со способом получения *in situ* величин. При использовании данного метода оценки выбросов, меняется картина результатов работы алгоритмов, но не меняется характер условий, в которых алгоритмы точнее восстанавливают ЧПС. Представляется перспективной разработка нового алгоритма на основе полученного ряда значений входных параметров.

Список литературы

- 1) Алимов А.Ф. Введение в продукционную гидробиологию. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 152 с.
- 2) Serret P., Robinson C., Fernández E., Teira E., Tilstone G., Pérez V. Predicting plankton net community production in the Atlantic Ocean. //Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. – 2009. – Т. 56. – №15. – С. 941–953
- 3) Teira E., Mourin B., Maran E., Pérez V., Pazó M. J., Serret P., Armas D., Escáñez J., Woodward E. M. S., Fernández E. Variability of chlorophyll and primary production in the Eastern North Atlantic Subtropical Gyre: potential factors affecting phytoplankton activity //Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. – 2005. – Т. 52. – №. 4. – С. 569-588
- 4) Кузьмина С. К. Восстановление чистой первичной продукции планктона (сообщества) с помощью спутниковых данных в водах Атлантического океана. //С 23 Сборник материалов участников XVIII Большого географического фестиваля, посвящённого ... А.Г. Исаченко (1922-2018 гг.). 2022. Санкт-Петербург: Свое издательство, С. 317-141
- 5) Tilstone G. H., Xie Y., Robinson C., Serret P., Raitos D.E., Powell T., Aranguren-Gassis M., Garcia-Martin E.E., Kitidis V. Satellite estimates of net community production indicate predominance of net autotrophy in the Atlantic Ocean. //Remote Sensing of Environment. – 2015. – Т. 164. – С. 254-269

ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННОГО И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Мухамадиева А.Р., Фролова Н.С.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Баренцево море, хлорофилл «а», спутниковые данные, сервис Giovanni.

В данной статье проведена оценка пространственно-временной изменчивости состояния фитопланктона Баренцева моря с 2002 года по 2021 г. по спутниковым данным о концентрации хлорофилла «а». Одна из важных особенностей Баренцева моря – кокколитофоридные цветения, которые происходят почти ежегодно в период с июля по сентябрь. Их расположение меняется в разные годы, но они всегда находятся южнее Полярного фронта и связаны с поступающими атлантическими водами.

В работе были использованы данные среднемесячных значений температуры и концентрации хлорофилла «а», осреднённые по всей акватории моря. Эти данные были получены с помощью сервиса Giovanni [1]. Кроме того, в безоблачные дни были проанализированы спутниковые изображения Баренцева моря в естественном цвете, которые затем использовались для выявления районов, подверженных бурному развитию фитопланктона. Реальное покрытие акватории Баренцева моря спутниковыми данными дает возможность оценить сезонную и межгодовую изменчивость с достаточной степенью надежности только для теплого сезона (март-сентябрь). Полученные результаты сезонной изменчивости фитопланктона (хлорофилла «а») по данным спутникового сканера MODIS хорошо согласуются с оценками различных исследователей, описывающих развитие фитопланктона в Баренцевом море: первый, весенний, максимум в развитии фитопланктона Баренцева моря наблюдается в конце марта и апреле (период его достижения составляет от одной до трех-четырёх недель), второй, летний, максимум – в июле – августе, третий максимум, связанный с «цветением» диатомовых водорослей, отмечается в сентябре [2, 3, 4]. Во временном ходе температуры и хлорофилла «а» прослеживается четкая периодичность. Минимальные значения среднемесячной температуры наблюдаются в апреле-мае, а максимальные – в августе. Самое высокое значение температуры поверхности моря за весь период наблюдений зафиксировано в 2013 – около 9°C в августе. Более детальный анализ временного хода изменчивости данных характеристик показал, что резко выраженный максимум концентрации хлорофилла «а», связанный с майским цветением фитопланктона, наблюдается почти ежегодно в диапазоне 3-3.5 мг/м³, и только в мае 2018 года это значение доходит до 4.5 мг/м³. Вторая волна цветения фитопланктона приходится на лето, но она значительно слабее первой весенней.

Важнейшим фактором, определяющим пространственное распределение биооптических характеристик, включая концентрацию хлорофилла «а», в Баренцевом море, является поступление с запада в виде поверхностных течений относительно теплых и соленых атлантических вод. Навстречу им с севера и северо-востока поступают более холодные и менее соленые арктические воды. В мае за эту границу можно условно принять изотерму 3 °С, в августе – 7 °С. Одним из наблюдаемых проявлений влияния теплых атлантических вод на экосистему баренцевоморского шельфа может служить возрастание частоты и продолжительности явлений массового развития кокколитофорид [5]. Обычно цветения кокколитофорид более характерны для центральной части Баренцева моря в летний период (июль-сентябрь) [4, 5, 6].

В ходе анализа пространственного распределения концентрации хлорофилла «а» было отмечено, что в прибрежной зоне Баренцева моря концентрация хлорофилла «а» заметно выше, чем в открытых районах. Это объясняется тем, что в море вместе с речным стоком попадают биогенные элементы, которые оказывают влияние на «цветение» фитопланктона. К тому же не следует забывать, что стандартные алгоритмы расчета концентрации хлорофилла «а» по спутниковым

данным не учитывают региональную специфику морей, что также приводит к завышению данной характеристики [5].

Проведенный анализ с учетом работ других исследователей позволил выявить определенные закономерности и в характере сезонной изменчивости концентрации хлорофилла «а»: диатомовые водоросли достигают пика в мае и июне, а затем уступают место кокколитофоридам, «цветение» которых фиксируется по изображениям спутниковых сканеров цвета. В ходе анализа литературных источников было обнаружено, что именно в этот период некоторые питательные вещества (минеральные формы азота и фосфора) заканчиваются, а воды становятся более теплыми и слоистыми (стратифицированными). Эти условия идеально подходят для того, чтобы кокколитофориды доминировали в поверхностных водах Баренцева моря. «Цветение» этого вида фитопланктона представляет значительный интерес для изучения цикла углерода в толще моря в соответствующих районах.

Список литературы

- 1) Интерактивная система Giovanni. URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- 2) Дудина Т.В. Первичная продукция фитопланктона и сообщества донных продуцентов юго-восточной части Баренцева моря в условиях полярного дня // Труды ВНИРО. 2014. Т. 152. С. 155-168.
- 3) Биологический атлас морей Арктики 2000: планктон Баренцева и Карского морей. URL: http://epic.awi.de/id/eprint/34319/26/bio-atlas-barents-kara_2000_ru.pdf
- 4) Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Каралли П.Г., Юшманова А.В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998-2017 гг. М.: ООО «ВАШ ФОРМАТ», 2018. – 140 с.
- 5) Буренков В.И., Копелевич О.В., Ратькова Т.Н., Шеберстов С.В. Спутниковые наблюдения цветения кокколитофорид в Баренцевом море // Океанология. 2011. Т. 51. № 5. С. 818–826.
- 6) Паутова Л.А., Силкин В.А., Кравчишина М.Д., Чульцова А.Л., Лисицын А.П. Карбонатный биологический насос в Норвежском и Баренцевом морях: механизмы регуляции // Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле. 2020. Т. 490. № 1. С. 55–60.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА И МУТНОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ В ПРИУСТЬЕВЫХ ЗОНАХ МОРЕЙ НА ОСНОВЕ СИНХРОННЫХ СПУТНИКОВЫХ И НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Назирова К.Р.

Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва

Ключевые слова: концентрация взвешенного вещества, мутность морской воды, речной плюм, спутниковые данные оптического диапазона, измерения in-situ, алгоритмы ACOLITE.

Поступление речных вод в морские акватории играет важную роль в физических, химических и биологических процессах в океане, будучи основным источником поступления взвешенных и растворенных терригенных и биогенных веществ, а также антропогенного загрязнения. Приустьевые области высоко динамичны, быстро изменчивы и наиболее сложны как для численного моделирования, так и для получения количественной информации с применением спутниковых методов. Поэтому для каждого исследуемого района необходимо проводить верификацию спутниковых данных и вносить потенциально возможные корректировки в используемые алгоритмы расчетов количественных характеристик: концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды, в нашем случае.

Результаты данной работы входят в цикл работ автора, посвященных проблеме адекватной интерпретации спутниковых данных и получения продуктов, пригодных для научного и практического использования вместо дорогостоящих натуральных измерений. Актуальность поставленных в работе задач обусловлена необходимостью совершенствования методов, средств и технологий по оценке параметров водной среды с использованием новейших дистанционных методов, поскольку именно с речными выносами связаны такие актуальные вопросы, как пространственное распределение и динамика взвешенного вещества, размыв берегов, искусственное пляжеобразование и т.д.

В работе представлены результаты исследования основных параметров плюмов рек Терек и Сулак, впадающих в Каспийское море севернее г. Махачкала, на основе данных спутникового зондирования в оптическом диапазоне с высоким пространственным разрешением и подспутниковых измерений in-situ. Основной целью исследования было сравнение значений мутности морской воды, полученных с помощью портативного мутномера, STD-зондом и определенных по данным спутникового зондирования с использованием различных стандартных алгоритмов. Одновременно с STD-зондированием в приповерхностном слое брались пробы воды для оценки концентрации взвешенного вещества весовым методом и для определения минерального состава взвеси. Рентгенофазовый анализ образцов был выполнен в лаборатории кристаллохимии и рентгеноструктурного анализа кафедры кристаллографии и кристаллохимии МГУ имени М.В. Ломоносова. В качестве спутниковых данных использовались данные высокого пространственного разрешения приборов MSI спутников Sentinel-2 и OLI/TIRS спутников серии Landsat 8/9. Ко всем спутниковым данным уровня 1 была применена атмосферная коррекция с использованием метода Dark-Spectrum Fitting (DSF) [1]. Все вычисления проводились с использованием программного обеспечения ACOLITE. По спутниковым данным строились следующие продукты: цветосинтезированное изображение в естественных цветах (True Color Image, TCI); температура поверхности моря (Sea Surface Temperature, SST); полное содержание взвешенного вещества (Total Suspended Matter, TSM); концентрация взвешенного вещества (Suspended Particulate Matter, SPM); мутность (Turbidity, Turb) [2]. Для расчета количественных характеристик концентрации взвешенного вещества и мутности морской воды в данной работе были использованы стандартные алгоритмы, входящие в пакет ACOLITE: Nechad 2009, Nechad 2015 и Dogliotti.

Анализ полученных данных показал, что мутность вод в плюме р. Терек существенно выше мутности в плюме р. Сулак. На станциях зондирования вблизи устья р. Терек измеренные значения мутности достигали 608 NTU, в то время как значения мутности у устья р. Сулак не превышали 140 NTU. Как показали наши предыдущие исследования для приустьевой зоны р. Мзымта, для существенно разных значений мутности надо применять различные стандартные алгоритмы определения этого параметра на основе спутниковых данных [3,4]. Для определения мутности в приустьевой зоне р. Терек наилучшие результаты показало использование алгоритма Dogliotti, разработанного именно для вод с большой мутностью [5]. Для вод плюма р. Сулак ни один из алгоритмов не показал близкие к измеренным in-situ значениям мутности, что может быть объяснено разницей в сутки между спутниковым зондированием и натурными измерениями, учитывая, что положение границы плюма р. Сулак сильно меняется во времени. По данным рентгенофазового анализа было установлено, что вблизи устьев минеральный состав взвеси в Тереке и Сулаке почти одинаковый. Он характеризуется содержанием безводных алюмосиликатов, глинистого и карбонатного материала примерно в равном количестве. Существенное отличие состава взвеси в выносе этих рек проявлено в количественном соотношении минералов у границ плюмов. Изменение минерального состава взвеси сопровождается значительным изменением мутности вод, определенной, как in-situ, так и по спутниковым данным.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-27-00124.

Список литературы

- 1) Vanhellemont Q., Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives, Remote Sens. Environ., 2019, Vol. 225, pp. 175–192, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.010>.
- 2) Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Kerstin S., Embacher S., Ruescas A., Evolution of the C2RCC Neural Network for Sentinel 2 and 3 for the Retrieval of Ocean Colour Products in Normal and Extreme Optically Complex Waters, Proc. Living Planet Symposium, 2016, ESA-SP 740, ISBN: 978-92-9221-305-3.
- 3) Лаврова О.Ю., Назирова К.Р., Алферьева Я.О., Жаданова П.Д., Строчков А.Я. Сопоставление параметров плюмов рек Сулак и Терек на основе спутниковых данных и измерений in situ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 264–283 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283.
- 4) Назирова К.Р., Лаврова О.Ю., Краюшкин Е.В., Соловьев Д.М., Жук Е.В., Алферьева Я.О. Особенности выявления параметров речного плюма контактными и дистанционными методами // [U+202F] Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 227–243. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243.
- 5) Dogliotti A.I., Ruddick K.G., Nechad B., Doxaran D., Knaeps E. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters // Remote Sens. Environ. 2015. Т. 156. С. 157-168. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>.

АНАЛИЗ ДАННЫХ О КОЭФФИЦИЕНТЕ ЯРКОСТИ МОРЯ И БИООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ, ИЗМЕРЕННЫХ КОНТАКТНЫМИ И ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ В КАРСКОМ МОРЕ ОСЕНЬЮ 2022 Г.

Павлова М.А.^{1,2}, Глуховец Д.И.^{1,2}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный

Ключевые слова: коэффициент яркости моря, палубный спектрорадиометр, спутниковый сканер цвета, региональный алгоритм, показатель поглощения желтым веществом, концентрация хлорофилла-а, показатель ослабления морской воды, показатель рассеяния назад взвешенными частицами.

Осенью 2022 года в течение 89-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Карское море (АМК-89) были получены новые данные о коэффициенте яркости моря R_{rs} с помощью макета палубного спектрорадиометра (ПСР), разработанного на основе малогабаритного спектрофотометра Ocean Optics Flame. Одним из основных преимуществ ПСР является возможность проведения измерений не только на станциях, но и на ходу судна. Данные о коэффициенте яркости моря несут информацию о биооптических характеристиках поверхностного слоя морской воды. Эта информация может быть использована для экологического мониторинга и расчетов теплового баланса, что актуально в условиях происходящих в Арктике климатических изменений. Цель работы - региональная настройка алгоритма для восстановления значений биооптических характеристик и их последующего сравнения с другими источниками данных. Полученные значения коэффициента яркости моря преимущественно находятся в соответствии с данными плавающего спектрорадиометра ПРО-1. На основе спектров R_{rs} , полученных с помощью ПСР, с использованием алгоритма GIOP восстановлены значения биооптических характеристик: показателя поглощения желтым веществом и детритом $a_{dg}(443)$, концентрации хлорофилла-а $Xл$ и показателя рассеяния назад частицами $b_{bp}(550)$ [1]. Далее производилось их сопоставление с результатами прямых измерений: концентрации хлорофилла-а; показателя ослабления $c(530)$ на поверхности, измеренного автономным прозрачномером ПУМ-200; показателя поглощения ОРОВ $a_g(443)$, определенного интегрирующей сферой в конфигурации ICAM.

Сравнение восстановленных из спектров R_{rs} концентраций хлорофилла-а с результатами прямых измерений $Xл$ показало необходимость настройки модели расчета. В свою очередь, значения $a_{dg}(443)$, полученные на основе R_{rs} , хорошо соответствуют данным $a_g(443)$, измеренным интегрирующей сферой. Поэтому для уточнения значений $Xл$ в качестве фиксированных параметров модели были использованы данные о показателе поглощения ОРОВ и наклоне спектральной кривой поглощения S , полученные на основе измерений ICAM. Для оценки эффективности процедуры было выбрано 7 станций с измерениями «ПСР - $Xл$ - ICAM». Результат расчетов показал, что применение натуральных данных о $a_g(443)$, измеренных интегрирующей сферой, и рассчитанных соответствующих S не улучшил значения $Xл$. Это связано с тем, что в водах Карского моря биооптические характеристики морской воды в большей степени определяются вкладом ОРОВ, чем $Xл$.

Показатель ослабления определяется как сумма показателей поглощения и рассеяния. Поэтому были рассчитаны $b_{bp}(530)$ и $a_{dg}(530)$ по данным, восстановленным из спектров R_{rs} , измеренных ПСР. Далее были построены графики зависимостей $b_{bp}(530)$ и $a_{dg}(530)$ от $c(530)$. Коэффициенты детерминации R^2 составили примерно 0,9 в обоих случаях. Полученный результат говорит о том, что основными процессами, влияющими на распространение света в поверхностном слое, являются поглощение желтым веществом и рассеяние назад частицами взвеси. Данный вывод подтверждает

и географическое положение станций, на которых проводились измерения: большинство из них находятся в прибрежных зонах, где ярко выражено влияние упомянутых компонент на первичные гидрооптические характеристики морской воды.

Натурные данные о коэффициенте яркости моря и биооптических характеристиках сравнивались с данными дистанционного зондирования: были использованы продукты L2 спутниковых сканеров цвета MODIS и VIIRS. Важно отметить, что для первого этапа АМК-89 абсолютная разница по времени между контактными и дистанционными измерениями составила не более 24 часов, а для второго этапа - не более 48 часов. К подобранным спутниковым снимкам были применены региональные алгоритмы расчетов $a_g(443)$ [2] и Хл [3], что позволило получить более точные данные о биооптических характеристиках. Например, СКО восстановления значений Хл, полученных с использованием примененных к данным спутниковых сканеров цвета региональных алгоритмов, меньше, чем для результатов работы стандартных спутниковых алгоритмов и значений Хл, восстановленных из натуральных спектров R_{rs} .

Относительно высокие величины рассчитанных ошибок (СКО, систематическое смещение) определения R_{rs} с помощью алгоритмов стандартной атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета подтверждают необходимость их региональной настройки для верного учета вклада составляющих атмосферы в общий сигнал. Например, наблюдались завышенные значения в коротковолновых каналах (412, 443 нм) MODIS и VIIRS; а спутниковые данные VIIRS, подобранные ко второму этапу АМК-89, характеризовались заниженными значениями R_{rs} в длинноволновом канале (671 нм).

Таким образом, получены новые данные натуральных измерений, настроены биооптические алгоритмы с учетом региональных особенностей Карского моря, а также выполнена проверка качества стандартной атмосферной коррекции. Показана необходимость совершенствования алгоритмов расчета Хл по данным о R_{rs} , а также алгоритмов атмосферной коррекции.

Авторы благодарят участников 89-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» за помощь в измерениях и предоставление натуральных данных.

Данные судовых измерений получены в рамках государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2021-0001. Обработка данных проводилась по проекту РНФ № 21-77-10059.

Список литературы

- 1) Павлова М.А., Глуховец Д.И., Круглинский И.А. Валидация данных спутниковых сканеров цвета по данным палубного спектрорадиометра // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2022. С. 203.
- 2) Вазюля С.В., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Артемьев В.А. Оценка по спутниковым данным показателей поглощения окрашенного органического вещества и диффузного ослабления солнечного излучения в водах Белого и Карского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 31-41.
- 3) Demidov A.B., Kopelevich O.V., Mosharov S.A., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V. Modelling Kara Sea phytoplankton primary production: Development and skill assessment of regional algorithms // Journal of Sea Research. 2017. V. 125. P. 1–17.

ОЦЕНКА ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ В МОРСКОЙ ВОДЕ ДЛЯ ЗАДАЧ ЛИДАРНОГО МОНИТОРИНГА

Позднякова В.В., Кустикова М.А.

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург

Ключевые слова: морские залежи углеводородов, рамановская спектроскопия, метод комбинационного рассеяния, обнаружение морских месторождений, оптические характеристики углеводородных газов.

Восполнение сырьевой базы более экономичными и экологичными методами является все более актуальной задачей. В связи с этим особую актуальность имеют исследования, посвященные разработке аппаратуры геологоразведки. В ходе анализа существующих морских месторождений было выявлено, что месторождения характеризуются повышенным содержанием углеводородных газовых пузырьков на поверхности воды, а также повышенным содержанием этих веществ в самих водах [1]. Углеводородные газы, высвобождаемые из морских залежей, сопровождаются ореолами рассеяния, которые могут быть зафиксированы различными методами, в том числе оптическими [2].

Целью работы являлось выявление и описание оптических характеристик растворенных в воде углеводородных газов с использованием метода комбинационного рассеяния или рамановской спектроскопии.

К основным трудностям нахождения морских месторождений оптическими методами можно отнести такие особенности, как: влияние океанической воды на цвета предметов, мутность морской воды и ее минерализация [3].

На основе проведенного анализа оптических характеристик растворенного вещества, были определены компоненты морской воды: чистая (пресная) вода, соленые вещества и другие органические соединения. В связи с этим, оптические характеристики будут меняться с изменениями концентраций перечисленных веществ и будут иметь разный вид при разных длинах волн.

Для выполнения целей данной работы использовался метод комбинационного рассеяния. Его принцип действия заключается в появлении частот, смещенные относительно возбуждающей линии при освещении образца монохроматическим излучением в спектре рассеянного излучения. Этот дополнительный спектр соответствует колебательно-вращательным переходам в молекулах исследуемого вещества [4]. Спектр каждого вещества в различных условиях и состояниях уникальный, поэтому, зная пиковые значения, представляется возможным разработать систему лидарного мониторинга.

Для начала были исследованы спектры рамановских сдвигов пресной воды. Затем рассматривалось влияние разной степени минерализации на имеющийся спектр. Соленость воды варьировалась от 25% до 35%, что соответствует средней солености Арктических морей. В качестве газа калибратора использовался азот, так как его концентрацию в атмосфере можно принять за константу.

Таким образом, была выявлена следующая закономерность: спектры соляного раствора с растворенным в нем газом изменяются линейно с ростом солености. Представленные данные в дальнейшем могут применяться в качестве реперных точек для аппаратуры подводной геологоразведки.

Список литературы

- 1) Boulart C., Connelly D.P., Mowlem M.C. Sensors and technologies for in situ dissolved methane measurements and their evaluation using Technology Readiness Levels // Trends in Analytical Chemistry. 2010. V. 29, No. 2, P. 186-195.

- 2) Салюк П.А., Буланов В.А., Корсков И.В., Буланов А.В., Крикун В.А., Майор А.Ю., Бубновский А.Ю., Букин О.А., Ляхов Д.Г. Возможность дистанционного обнаружения повышенных концентраций метана в морской воде с использованием методов оптической спектроскопии на подводных телеуправляемых аппаратах // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 2(12), С. 43-51.
- 3) Шифрин К.С. Введение в оптику океана - Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. – 273 с.
- 4) Новикова В.А., Варжель С.В., Рассеяние света и его применение в волоконной оптике – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 39 с.

РАЗЛИЧИЯ МЕЖДУ СТАНДАРТНЫМИ ПРОДУКТАМИ NASA И EUMETSAT ДЛЯ ДАННЫХ SENTINEL-3 A/B OLCI L2

Скороход Е.Ю., Чурилова Т.Я., Ефимова Т.В., Моисеева Н.А., Землянская Е.А.,
Бучельников А.С.

ФГБУН ФИЦ "Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН", г. Севастополь

Ключевые слова: OLCI, Черное море, прибрежные воды, шельфовые воды, концентрация хлорофилла-а, окрашенное растворенное органическое вещество, неживое взвешенное вещество, пигменты фитопланктона.

Прибрежные воды считаются оптически сложными и относятся к водам класса Case-2 [1]. Присущие оптические свойства таких вод определяются содержанием окрашенного растворенного органического вещества и неживого взвешенного вещества, тогда как в водах Case-1 основным оптически активным компонентом являются пигменты фитопланктона. Обогащение прибрежных вод питательными элементами с береговым и речным стоками вызывает интенсивное развитие водорослей и цветение фитопланктона, что может привести к заморным явлениям [2, 3].

Современные технологии, включающие дистанционное зондирование Земли из космоса, позволяют получать данные с высоким пространственным разрешением в режиме близком к реальному времени. Использование таких данных может помочь отслеживать кратковременные аномалии и общее состояние водной среды в рамках регулярного мониторинга. За счет высокого пространственного и временного разрешения для мониторинга прибрежных вод подходят данные со сканера цвета океана OLCI на ИСЗ Sentinel-3A and 3B.

Для пользователей данные с OLCI доступны на ресурсах EUMETSAT и NASA. Различие между данными на этих ресурсах заключается в атмосферной коррекции и в наборе доступных продуктов. Так, к примеру, для данных NASA доступен спутниковый продукт «показатель поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 443 нм» (aph_443), которого нет в списке продуктов от EUMETSAT.

Было выполнено сравнение аналогичных спутниковых продуктов второго уровня обработки между собой и с результатами натурных измерений в прибрежных водах Черного моря в период с августа 2018 по декабрь 2020 гг. Отбор проб и их последующая обработка проводились в соответствии с действующим протоколом NASA [4].

Степень покрытия данными оказалась высокой (от 62 до 74% кроме aph_443) в отличие от точности самих продуктов относительно *in situ* данных, а именно:

1. Для продукта "концентрация хлорофилла а" покрытие составило 69/74/66 %, смещение (*bias*) – 1,5/0,87/1,6, средняя абсолютная ошибка (*MAE*) – 1,9/2,2/2,0, среднее абсолютное отклонение (*MdAD*) – 2/1,7/1,9 и среднеквадратичное отклонение (*RMSE*) – 0,64/2,6/0,84 для CHL_OC4 (EUMETSAT), CHL_NN (EUMETSAT) и chlor_a (NASA) соответственно.

2. Для "показателя поглощения света неживым взвешенным и окрашенным растворённым органическим веществом на длине волны 443 нм" покрытие составило 74 и 62%, *bias* – 1,1 и 1,3, *MAE* – 2,2 и 2,4, *MdAD* – 1,8 и 1,8, *RMSE* – 0,86 и 0,51 по ADG_443 (EUMETSAT) и adg_443 (NASA) соответственно.

3. Для "показателя поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 443 нм" aph_443 (NASA) покрытие составило всего 34%, *bias* – 0,51, *MAE* – 2,1, *MdAD* – 1,7 и *RMSE* – 0,04.

Учитывая выявленную низкую точность всех рассмотренных доступных спутниковых продуктов их не следует использовать при оценке состояния прибрежных вод Чёрного моря. Такая низкая

точность спутниковых продуктов вероятно связана с отсутствием в стандартных алгоритмах учета variability вклада показателей поглощения света оптически активными компонентами в общее поглощение света.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Изучение пространственно-временной организации водных и сухопутных экосистем с целью развития системы оперативного мониторинга на основе данных дистанционного зондирования и ГИС технологий» (№ 121040100327-3) и при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-27-00790.

Список литературы

- 1) Morel A., Prieur L. Analysis of Variations in Ocean Color // *Limnology and Oceanography*. 1977. Vol. 22. P. 709-722.
- 2) Babin M., Morel A., Fournier-Sicre V., Fell F., Stramski D. Light Scattering Properties of Marine Particles in Coastal and Open Ocean Waters as related to the Particle Mass Concentration // *Limnology and Oceanography*. 2003. Vol. 48. P. 843-859.
- 3) Zheng G., DiGiacomo P.M. Remote Sensing of Chlorophyll-a in Coastal Waters Based on the Light Absorption Coefficient of Phytoplankton // *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 201. P. 331-341.
- 4) Neeley A.R., Mannino A., Boss E., D'sa E.J., Freeman S., Fry E., Mueller J.L., Pegau S., Reynolds R.A., Roesler C., et al. Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient // *IOCCG Protocol Series Ocean Optics & Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation*. 2018. Vol. 1.

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ МИКРОВОДОРОСЛИ *TETRASELMIS VIRIDIS*, ИНФИЦИРОВАННОЙ АЛЬГОВИРУСОМ

Шоларь С.А.¹, Степанова О.А.²

¹Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

²Институт природно-технических систем РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: *Tetraselmis viridis*, поглощение света, спектрофотометрия, интегрирующая сфера, морские альговирuses, фитопланктон, микробиота.

По данным литературы и по результатам проведенных ранее исследований было установлено, что вирусный лизис оптически значимых биологических частиц – клеток бактерий, микроводорослей и простейших – представляет собой малоизученный процесс, быстро трансформирующий одноклеточные организмы сообществ гидросферы (хозяев водных вирусов) в новые типы оптически значимого материала (окрашенное растворенное органическое вещество, обломки клеток и т.д.) [1-4]. Следовательно, вирусный лизис оказывает значительное влияние на оптические свойства воды гидросферы. Такой современный подход предполагает необходимость и актуальность учета водных вирусов и вирусного лизиса в физике, и в частности оптике моря.

Цель работы – установить методом спектрофотометрии изменения поглощения света монокультурой *Tetraselmis viridis*, инфицированной альговирuсом (опыт), на фоне контроля роста и развития микроводоросли без вируса с возможным учетом и/или экстраполяцией полученных результатов на морскую среду черноморского региона в периоды «цветения» этой микроводоросли.

Жидкая альгологически чистая культура микроводоросли *Tetraselmis viridis* была получена из коллекции живых культур микроводорослей отдела экологической физиологии водорослей ФИЦ «ИнБИОМ А.О. Ковалевского РАН» и в дальнейшем поддерживалась в стабилизирующей среде Гольдберга в лабораторных условиях на базе Института природно-технических систем. В опытах использовали альговирuс к этой микроводоросли (штамм TvV-SI1) из авторской коллекции альговирuсов. Сведения о свойствах черноморских альговирuсов, а также о методах их поиска, изоляции, изучения и использования в модельных экспериментах представлены в монографии [5].

Эксперименты выполняли с использованием в опыте культуры микроводоросли (до 4 мл) и вирусной суспензии (1 мл). В контроль кроме культуры микроводоросли добавляли пастеризованную морскую воду или стабилизирующую среду Гольдберга в идентичном вирусной суспензии объеме (1 мл).

Спектры поглощения аликвот из опыта и контроля регистрировались в 1 см кюветах в диапазоне от 350 до 750 нм с шагом 1 нм на однолучевом спектрофотометре МС 122А (производитель: Минск, Беларусь). Спектрофотометр оснащён устройством диффузного пропускания и отражения (ДПО) с интегрирующей сферой (ИС). В процессе измерения кювета размещается перед ИС в кюветодержателе устройства ДПО. Внутренний диаметр ИС – 50,8 мм (2 дюйма). Покрытие внутренней поверхности ИС – BaSO₄.

Измерения проводили 1 раз в день в утренние часы, для чего из пробирок (опыт и контроль) отбирали аликвоты (по 3,5мл). Одним из методических условий спектрофотометрии материала, содержащего вирусы, является тщательная обработка кювет (дезинфекция спиртом) после каждого их использования.

В опыте наблюдали постепенное падение численности клеток, оцениваемое по уменьшению оптической плотности на длине волны 750 нм, а в контроле после падения числа клеток, связанного с акклиматизацией культуры, фиксировали устойчивый рост (увеличение оптической плотности, что свидетельствует об увеличении численности клеток). Спустя 7 суток спектр контрольного роста культуры *Tetraselmis viridis* принял характерный для этой культуры вид, что описано и представлено на одном из рисунков (рис. 2) в работе [6], а спектр инфицированной вирусом и

лизированной в ходе эксперимента культуры микроводоросли принял вид спектра, близкого к спектру растворенного органического вещества (РОВ).

В ходе впервые проведенных экспериментов с использованием спектрофотометрии в целях изучения вирусного лизиса (контакт черноморской микрокультуры и черноморского альговируса) было подтверждено его влияние на снижение оптической плотности и численности клеток микроводоросли *Tetraselmis viridis* в опыте, что привело к характерному изменению спектра поглощения света суспензией монокультуры в спектр, характерный для РОВ. Также была адаптирована методика проведения спектрофотометрии для изучения вирусного лизиса на уровне контакта культуры микроводоросли (имитация цветения микроводоросли в гидросфере с подключением процесса вирусного лизиса, поддерживающего динамическое равновесие численности представителей фитопланктона).

Эксперименты по изучению роли вирусного лизиса в изменениях оптических характеристик водной среды (в оптике моря) будут продолжены с расширением видового состава культур микроводорослей и альговирусов.

Работа выполнена в рамках государственного задания по госбюджетной теме ФИЦ МГИ РАН FNNN-2021-0003 и госбюджетной теме ИПТС № 0012-2021-0010.

Список литературы

- 1) Fuhrman J.A., Suttle C.A. Viruses in marine planktonic systems // *Oceanography*. 1993. Vol. 6. N 2. P. 51-63.
- 2) Stramski D., Mobley C.D. Effects of microbial particles on oceanic optics: A database of single-particle optical properties // *Limnology and Oceanography*. 1997. Vol. 42. N 3. P. 538-549.
- 3) Sholar S.A., Stepanova O.A. The Role of Viruses and Viral Lysis in Changing the Optical Properties of the Water Environment of their Habitat // *Biophysics*. 2021. Vol. 66. No. 2. P. 182–191.
- 4) Патент № 2759907 С1 Российская Федерация, МПК С12М 1/02, С12М 1/34, С12М 1/36. Мобильная установка для определения в режиме удаленного доступа влияния штаммов черноморских альговирусов и вирусного лизиса представителей фитопланктона на оптико-физические свойства морской воды : № 2020137272 : заявл. 12.11.2020 : опубл. 18.11.2021 / М.Е.Г. Ли, С.А. Шоларь; заявитель ФГБУН ФИЦ МГИ РАН.
- 5) Степанова О.А., Шоларь С.А. Мониторинг черноморских альговирусов. Севастополь: ИПТС. 2022. 115 с.
- 6) Чернышев Д.Н., Горбунова С.Ю., Тренкеншу Р.П. Разделение спектров поглощения культуры и ацетонового экстракта микроводоросли *Tetraselmis viridis* на спектры отдельных пигментов // *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. 2020. Т. 5. №. 2. С. 232-238.

УЧЕТ ПРОСЛОЙКИ ВОЗДУХА МЕЖДУ КВАРЦЕМ И ФЛУОРИЛОНОМ В ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СФЕРЕ

Юшманова А.В.¹, Шеберстов С.В.¹, Глуховец Д.И.^{1,2}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный

Ключевые слова: поглощение света морской водой, интегрирующая сфера ICAM, численное моделирование методом Монте-Карло.

Информация о поглощении света дает возможность определить состав морской воды, наличие оптически активных примесей в виде растворов и взвесей. Натурные измерения поглощения морской воды возможны с помощью интегрирующих сфер [1], в которых за счет многократного рассеяния от сильно отражающих по ламбертовскому закону стенок создается изотропное поле, что тем самым позволяет исключить влияние рассеяния на измерение поглощения. Численное моделирование методом Монте-Карло дает информацию о структуре светового поля в интегрирующей сфере [2]. Моделирование проведено на основе существующего прибора ICAM [3-4], с учётом его конфигурации и особенностей: кварцевая колба, наполняемая пробой морской воды; флуорилоновая поверхность (Fluorilon 99-WTM); источник света расположен сбоку и световод – под углом 110 градусов к источнику. В каждой среде (морская вода, кварц и флуорилон) осуществляется моделирование событий, происходящих с фотоном: поглощение, рассеяние, столкновение с поверхностью. При столкновении с поверхностью фотон отражается или преломляется в другую среду в соответствии с формулами Френеля. Поляризация при этом не учитывается. Количество фотонов для оптимального анализа составляет 106-107. Флуорилон (политетрафторэтилен) – пористое вещество, полимер, который получают путем прессования и шлифовки. Так как получившийся материал имеет шероховатую поверхность, то в интегрирующей сфере ICAM между ним и кварцем существует прослойка воздуха, которая влияет как на параметры светового поля внутри, так и на регистрируемую в процессе измерений яркость выходящего излучения. В работах, опубликованных нами ранее [4-5], этот эффект не учитывался. Толщина прослойки больше длины волны света, так что применимо приближение геометрической оптики. Для учета эффекта рассчитан коэффициент отражения с учетом прослойки воздуха как сумма вероятностей событий по формуле геометрической прогрессии [6]. Полное внутреннее отражение в случае прослойки наступает при угле падения выше 44 градусов, без прослойки – при 69 градусах. В результате интенсивность сигнала при наличии воздушной прослойки выше до 22 процентов (в зависимости от показателя поглощения), чем при ее отсутствии. Это можно объяснить тем, что эффективный коэффициент отражения на границе кварц-флуорилон существенно выше при наличии воздушной прослойки, что повышает вероятность для фотона попасть в выходное отверстие после многократных отражений внутри кварцевой оболочки. Тем самым, воздушная оболочка между кварцевой колбой и флуорилоном увеличивает количество рассеяний фотонов и изотропность поля внутри сферы за счет многократных переотражений, что важно учитывать при численных расчетах. Однако на практике влияние этого эффекта снижается тем, что расчет поглощения выполняется с учетом калибровки по эталонным измерениям, выполненным на двулучевом спектрофотометре SPECORD M400 [4] и подбора соответствующих коэффициентов [5].

Результаты получены при поддержке проекта РНФ № 21-77-10059

Список литературы

- 1) Ricchetta P.J. Theory of Absorption and Scattering Within Integrating Spheres // JOSA. №1 (55). 1965. P. 21-26.

- 2) Kirk J.T.O. Modeling the performance of an integrating-cavity absorption meter: theory and calculations for a spherical cavity // Applied optics. № 21(34). 1995. P. 4397-4408.
- 3) Погосян С.И., Дургарян А.М., Конохов И.В., Чикунова О.Б., Мерзляк М.Н. Абсорбционная спектроскопия микроводорослей, цианобактерий и растворенного органического вещества: измерения во внутренней полости интегрирующей сферы // Океанология. № 6(49). 2009. С. 934-939.
- 4) Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Копелевич О.В., Зайцева А.Ф., Погосян С.И. Измерения показателя поглощения морской воды с помощью интегрирующей сферы // Светотехника. №. 5. 2017. С. 39-43.
- 5) Шеберстов С.В., Глуховец Д.И., Копелевич О.В., Зайцева А.Ф., Погосян С.И. Учет параметров интегрирующей сферы при измерении показателя поглощения морской воды методом ICAM // Труды IX конференции «Современные проблемы оптики естественных вод» 2017. С. 198-204.
- 6) Сивухин Д. В. Общий курс физики. Том 4. Оптика // Уч. пос. Физматлит. 1980. 768 с.

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ПОДВОДНОГО ПОИСКА ДЕФЕКТОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Бабаев Б.Г.¹, Новичков Д.Е.¹, Седов А.Н.²

¹Самарский государственный технический университет, г. Самара

²ООО "НПК"Сетецентрические платформы", г. Самара

Ключевые слова: автономный обитаемый подводный аппарат, нейронная сеть.

Поиск дефектов подводных частей инженерных сооружений, возводимых при устройстве железной дороги над водотоком, является исключительно важной задачей. В настоящее время эти процессы осуществляются с применением дорогостоящего и опасного труда водолазов [1]. Для повышения качества инспекций предлагается разработать программно-аппаратный комплекс для подводного поиска дефектов. В качестве примера таких дефектов рассмотрены следующие: трещина, пустой шов и разрушение бетонной кладки гидротехнических сооружений.

На базе СамГТУ совместно с ООО "НПК "Сетецентрические Платформы" разработан автономный обитаемый подводный аппарат (АНПА) «Калан» для проведения подводных исследований [2]. АНПА «Калан» способен осуществлять погружения до 30 метров и обладает автономностью хода до 2 часов, способен нести до 5кг полезной нагрузки, возможно установить дополнительные камеры бокового обзора, гидролокационные камеры. Из-за конструктивных особенностей аппарат, способен погружаться под воду параллельно снимаемому объекту. Аппарат предназначен для выполнения следующих задач: доставка грузов, фото, видео, акустическая фиксация подводных и надводных объектов. Именно такой аппарат может быть использован для поставленной задачи. Было решено разработать интеллектуальную систему для дальнейшего внедрения на роботизированный носитель.

На первом этапе целесообразна разработка прототипа такого комплекса, на котором можно было бы проверить правильность предлагаемых научно-технических решений. Функциональность такого Прототипа целесообразно ограничить основными функциями распознавания и идентификации нескольких типов основных дефектов. Система строилась на основе сверточной нейронной сети, что позволило создать модели каждого дефекта и обеспечило быстрое действие процесса распознавания. При обнаружении и распознавании фиксируется признак дефекта (дефект явный / скрытый, дефект есть, нет). При классификации фиксируется класс дефекта, и его конкретные характеристики (размеры, положение, величина и др.).

Для обучения нейронной сети был сформирован датасет (набор данных), состоящий из 700 изображений дефектов трех обозначенных видов, полученных путем декомпозиции видеофайлов с видимыми дефектами подводных бетонных объектов, все использованные изображения были в видимом диапазоне, стоит отметить, что все повреждения были чистыми. Была обучена модель поиска, произведена оценка работы системы, которая выявила неверное интерпретирование дефекта типа «Разрушение бетонной кладки», в связи с чем было принято решение произвести уточняющую разметку исходных данных, убрать из обучающей выборки изображения со смазами и мелкими дефектами. Также были уточнены критерии оценки правильности распознавания.

Новый датасет состоял из 635 изображений и был размечен следующим образом: 220 изображения с одной и более трещиной, пустой шов – 390 изображений и разрушение бетонной кладки 190 шт. Для обучения использовались pretrained веса, алгоритм оптимизации SGD Momentum, $lr = 10^{-2}$, momentum = 0.937, коэфф. L2 регуляризации 0.0005. Размер батча - 8 семпла. При обучении использовались различные аугментации: изменение яркости, насыщенности, смещения

(translition), скейлинг, мозаика. Обучение было запущено на 1000 эпох, с опцией раннего завершения, при отсутствии прогресса в течении 200 эпох. В итоге обучение шло около 500 эпох с ранним выходом. Наилучшие результаты были достигнуты на 301 эпохе.

Были проведены испытания системы на 50 снимках, 50% которых были задействованы в обучающей выборке. Тестовая выборка состояла из 21 элемента без дефектов, для оценки ошибки второго рода. 12 изображений трещин, 12 пустой шов и 5 изображений разрушение бетонной кладки. Результатом испытаний стало верное определение дефектов всех видов, на изображениях с одним и более дефектами в большинстве случаев были обнаружены все дефекты, точность распознавания на конкретной выборке получилась 94%. Дальнейшее развитие системы будет проводиться по двум направлениям: расширение модели распознавания (поиск новых типов дефектов, увеличение точности) и интеграция с АНПА «Калан».

Список литературы

- 1) Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Шеин А.А., Грацинский В.Г., Вдовин К.М. Особенности подводного обследования транспортных сооружений. Повреждения подводной части транспортных сооружений // Интернет-журнал "Науковедение 2013 № 6 (19) [Электронный ресурс]-М.: Науковедение, 2013 -.- Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/49TVN613.pdf>, свободный
- 2) Бабаев, Б.Г. Мониторинг бассейна реки волги с использованием автономных необитаемых надводно-подводных аппаратов // Системы контроля окружающей среды. 2021. С. 93

ПОСТРОЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ОРТОГОНАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПО ДАННЫМ РАССЕЯНИЯ СВЧ СИГНАЛА НА ОБРУШЕНИЯХ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

Байдаков Г.А., Русаков Н.С., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И.

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

Ключевые слова: лабораторное моделирование, ветровые волны, обрушение волн, радиолокация, УЭПР.

Одной из важнейших задач мониторинга состояния Мирового океана и морского пограничного слоя атмосферы является восстановление скорости приземного ветра и его направления по данным активного дистанционного зондирования. Расположенные на искусственных спутниках Земли микроволновые локаторы облучают водную поверхность и по мощности рассеянного назад сигнала определяют её эффективную площадь рассеяния (ЭПР). Для этого используются так называемые геофизические модельные функции (ГМФ), которые представляют собой эмпирические связи между удельной ЭПР водной поверхности и параметрами воздушного потока. Изначально для дистанционного зондирования использовалось излучение на согласованных по излучению и приёму поляризациях, но в этом случае принимаемая мощность имеет тенденцию к насыщению с ростом скорости ветра, что делает невозможным восстановление этого параметра при скоростях U_{10} выше 30-35 м/с. Использование ортогонально поляризованного сигнала позволяет решить эту проблему, но в условиях высоких скоростей ветра, когда водная поверхность характеризуется сложной реологией (обрушение поверхностных волн, покрытие пеной, брызги, взвешенные пузырьки воздуха), физические механизмы, лежащие в основе процесса рассеяния СВЧ-сигнала недостаточно изучены. При этом измерение параметров ветрового потока и волнения при сильном ветре в натуральных условиях технически сложны, поэтому можно использовать условия лабораторного эксперимента, обеспечивающие высокую повторяемость и контролируемость условий измерений.

В докладе рассматриваются результаты серии лабораторных экспериментов, направленных на исследование влияния обрушений поверхностных волн на обратное рассеяние СВЧ сигнала. Эксперименты были проведены на ветро-волновом канале Большого Термостратифицированного бассейна ИПФ РАН. В начале канала был размещен волнопродуктор, каждые 18 секунд генерирующий пучок из трех волн амплитудой около 10 см с частотой 1,04 Гц и длиной около 1 метра. Непосредственно перед исследуемым участком была установлена подводная наклонная пластина, имитирующая выход на мелководье и обеспечивающие многократное обрушение волн в зоне радиолокационной засветки и оптических наблюдений.

Радиолокационные измерения производились при нескольких углах зондирования (30, 40, 50 градусов) с использованием доплеровского скаттерометра [1], работающего на длине волны 3.2 см, с возможностью одновременного приема двух прямых и двух перекрестных поляризаций (VV, HH, VH, HV). Абсолютное значение эффективной площади рассеяния (ЭПР) взволнованной поверхности воды на согласованных поляризациях определялось путем сопоставления рассеянного сигнала с сигналом, отраженным от калибратора с известным значением ЭПР – металлического шарика диаметром 6 см. Для калибровки ортогональных поляризаций использовался вторичный калибратор в виде тонкой проволоки длиной 19,2 см, ориентированной под различными углами в плоскости, перпендикулярной излучению. Оптические измерения характеристик обрушений волн производились независимо от радиолокационных с помощью камеры с частотой съемки 50 Гц. С помощью специально разработанного алгоритма, детектирующего область обрушений на основе пороговой обработки яркости изображения, были вычислены временные зависимости доли обрушений от всей площади облучаемой водной поверхности при прохождении пучка из трех волн.

Совмещение временной зависимости мощности принятого сигнала и площади водной поверхности, покрытой обрушениями, происходило с помощью корреляционного анализа и было подтверждено данными, полученными с волнографов, установленных перед наклонной пластиной, как в случае радиолокационных, так и оптических измерений. После проведения процедуры временного совмещения, были восстановлены зависимости мощности принятого сигнала от площади обрушений, продемонстрировавшие чувствительность сигнала на перекрестной поляризации к наличию обрушений на водной поверхности. Предложена линейная аппроксимация этих зависимостей для каждого угла зондирования, позволяющая разделить вклад в рассеяние сигнала обрушений волн и коротковолновой ряби пропорционально занимаемой ими доли водной поверхности. В работе [2] в рамках численного моделирования показано, что вклад поверхности воды, свободной от обрушений, практически не зависит от скорости ветра и сравнительно слабо зависит от угла визирования. Доля покрытия поверхности обрушениями при этом зависит от скорости ветра, и исследовалась в натуральных условиях несколькими авторами. Так в [3] предложена функция зависимости доли покрытия обрушениями («active whitecap») от скорости ветра, которая была использована для формирования ГМФ на базе полученных в работе экспериментальных данных. Предложенная ГМФ показывает заметную чувствительность к скорости приводного ветра даже в условиях урагана и может служить основой для разработки алгоритма восстановления скорости ветра в ураганах по данным рассеяния микроволнового излучения на ортогональной поляризации.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 22-77-00076. Методика обработки радиолокационных сигналов разработана в рамках выполнения проекта РФФИ № 21-17-00214. Результаты получены с использованием оборудования Уникальной научной установки «Комплекс крупномасштабных геофизических стендов» ИПФ РАН (<http://www.ckp-rf.ru/usu/77738/>).

Список литературы

- 1) Зуйкова Э.М., Байдаков Г.А., Титченко Ю.А., Салин М.Б. Доплеровский скаттерометр трехсантиметрового диапазона с полным поляризационным зондированием // Журнал радиоэлектроники, 2021, № 2
- 2) Fois F., P.Hoogeboom, F. Le Chevalier, and A. Stoffelen Future Ocean Scatterometry: On the Use of Cross-Polar Scattering to Observe Very High Winds, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 53, NO. 9, SEPTEMBER 2015, 5009-5020
- 3) Scanlon, B., Ward, B., The influence of environmental parameters on active and maturing oceanic whitecaps, J. Geophys. Res. Oceans, 121, 3325– 3336

ПРОГНОЗНЫЕ МОДЕЛИ АКТИВНОСТИ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ АЛГОРИТМАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Вышкваркова Е.В., Греков А.Н., Трусевич В.В., Маврин А.С.

Институт природно-технических систем, г. Севастополь

Ключевые слова: аномалия, машинное обучение, моллюски, биологическая система раннего обнаружения.

Объективная оценка состояния водных экосистем невозможна без использования биологических методов экологического мониторинга. Своевременное обнаружение возможности возникновения чрезвычайных ситуаций биомаркерами, в подавляющем большинстве случаев, позволяет обеспечить проведение мероприятий по предотвращению нанесения ущерба среде и снизить последствия их воздействий. Особенно важно это для систем водоснабжения городов и крупных населенных пунктов. Не менее важно осуществлять такой контроль и в зонах выпускных коллекторов городов и промышленных предприятий. Следует отметить, что существующие системы контроля, основанные преимущественно на физико-химических методах, трудоемки, дорогостоящи, дают фрагментарные сведения, охватывают традиционный узкий круг загрязняющих агентов, не обеспечивают непрерывного мониторинга и своевременного обнаружения внезапного выброса загрязнений. В 2008 году разработан, а позже модернизирован, комплекс автоматизированного биомониторинга, являющийся аналогом системы Musselmonitor, предназначенный для эксплуатации в природных условиях водоемов [1]. Работа комплекса основана на фиксации и анализе поведенческих реакций моллюсков и генерации сигнала тревоги, при обнаружении аномалии. У двустворчатых моллюсков величина раскрытия створок, особенности ритмики их движений характеризуют фильтрационную активность а, следовательно и уровень их жизнедеятельности в нормальной и в токсической средах [2]. В отличие от биоэлектронной волоконно-оптической системы БиоАргус [3], в которой анализируется кардиоритм моллюсков в лабораторных условиях, наш комплекс работает *in situ*. Использование дополнительных измерительных каналов удорожает устройство и отрицательно влияет на надежность устройства, что критически важно при длительной эксплуатации. В работе [4] показана синхронная реакция движения створок и частоты сердечных сокращений моллюсков на воздействие раздражителей.

В настоящее время с помощью автоматических датчиков можно собрать большие наборы данных об активности моллюсков (движение створок), но их интерпретация затруднена из-за большого количества факторов окружающей среды и индивидуальной изменчивости. Работ по анализу активности двустворчатых моллюсков алгоритмами машинного обучения чрезвычайно мало. Одна из немногих работ Bertolini et al. [5], в которой авторы применили методы машинного обучения без учителя (кластеризация *k*-средних) для выявления устойчивых поведенческих закономерностей в активности створок двустворчатых моллюсков *Mytilus galloprovincialis* и *Mytilus edulis* в Венецианской лагуне и Ваттовом море. Методы машинного обучения позволяют настраивать (обучать) алгоритмы с использованием некоторого обучающего набора данных для решения различных задач. Методы машинного обучения в последние годы все чаще используются для классификации и кластеризации при оценке параметров окружающей среды биологическими системами. Например, для обнаружения загрязненных тяжелыми металлами мидий по данным спектроскопии, при обнаружении и прогнозировании вредоносного цветения водорослей в районах расположения мидийных ферм, для обнаружения концентрации полициклических ароматических углеводородов в мидиях семейства *dreissenid*, и для оценки границ их экологической ниши.

В работе построены прогнозные модели активности двустворчатых моллюсков различными алгоритмами машинного обучения в нормальных условиях среды для выявления аномалий в

поведенческих реакциях для формирования сигнала тревоги в комплексе автоматизированного биомониторинга водной среды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00558, <https://rscf.ru/project/23-29-00558/>.

Список литературы

- 1) Трусевич В.В., Гайский П.В., Кузьмин К.А. Автоматизированный биомониторинг водной среды с использованием реакций двустворчатых моллюсков // Морской гидрофизический журнал № 3. 2010. С. 75–83.
- 2) Trusevich V.V., Kuz'min K.A., Mishurov V.Zh., Zhuravsky V.Yu., Vyshkvarkova E.V. Features of Behavioral Responses of the Mediterranean Mussel in Its Natural Habitat of the Black Sea // Inland Water Biology 14(1). 2021. P. 10–19. DOI: 10.1134/S1995082921010132
- 3) Патент на полезную модель RU 106750 U1: Устройство для биологического мониторинга окружающей среды / Холодкевич С.В., Иванов А.В. Заявка № 2011109123/15 от 04.03.2011
- 4) Холодкевич С.В., Кузнецова Т.В., Трусевич В.В., Куракин А.С., Иванов А.В. Особенности движения клапанов и сердечной деятельности двустворчатого моллюска *Mytilus galloprovincialis* // Журнал Эволюционной Биохимии и Физиологии 45 (4). 2009. С. 432–434
- 5) Bertolini C., Capelle J., Royer E., Milan M., Witbaard R., Bouma T.J., Pastres R. Using a clustering algorithm to identify patterns of valve-gaping behaviour in mussels reared under different environmental conditions // Ecological Informatics 69. 2022. e101659. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101659>

РЕЗУЛЬТАТЫ СУДОВОЙ ЛИДАРНОЙ СЪЕМКИ В КАРСКОМ МОРЕ

Глухов В.А., Глитко О.В., Гольдин Ю.А., Родионов М.А.

Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: морской поляризационный лидар, дистанционное зондирование, внутренние волны, гидрооптические характеристики, Карское море.

Использование морских радиометрических лидаров с борта судна обеспечивает возможность измерения не только во время выполнения станций в дрейфе, но и на ходу судна. Лидарная съемка позволяет проводить дистанционную регистрацию вертикальной структуры и положения областей повышенных вертикальных градиентов показателя ослабления в приповерхностном слое морской воды, что в ряде случаев позволяет регистрировать внутренние волны [1], фиксировать положения светорассеивающих слоев [2], а также получать пространственные распределения коэффициента диффузного ослабления вдоль маршрута судна [3].

С помощью судового поляризационного лидара ПЛД-1 [4] в ходе 89-1 рейса НИС «Академик М. Келдыш» в сентябре 2022 г. были выполнены измерения в акваториях Баренцева и Карского морей. Одновременно с регистрацией лидарных эхо-сигналов производились сопутствующие измерения. На станциях в дрейфе судна измерялись вертикальные распределения показателя ослабления на длине волны 530 нм и флуоресценции хлорофилла «а» с помощью прозрачномера ПУМ-200, а также температуры, солености и мутности с помощью CTD-зонда SBE 19 с мутномером. На ходу судна производились измерения с проточным комплексом, измеряющим показатель ослабления, температуру, соленость, флуоресценцию хлорофилла «а» и растворенного органического вещества на глубине около 2 м.

В течение рейса значения показателя ослабления в верхнем слое менялись от высоких значений $2 - 2,5 \text{ м}^{-1}$ в Байдарацкой губе и в акватории Баренцева моря в области цветения кокколитофорида, до $0,2 - 0,3 \text{ м}^{-1}$ вблизи побережья Новой Земли. Наблюдалась изменчивость вертикальной структуры показателя ослабления на глубинах лидарного зондирования, выраженных в наличии светорассеивающих слоев.

Показано, что положение этих слоев хорошо определяется по форме спада кросс-поляризованной компоненты эхо-сигнала. В областях высоких горизонтальных градиентов показателя ослабления, зарегистрированных на ходу судна проточным комплексом, было проведено сравнение характеристик изменчивости величин, измеряемых комплексом, и амплитуд поляризационных компонент лидарных эхо-сигналов. В ряде случаев показано, что наибольшее сходство изменчивости амплитуд ко- и кросс- поляризованных компонент эхо-сигнала наблюдается с изменчивостью интенсивности флуоресценции хлорофилла «а».

Анализ характера затухания ко-поляризованной компоненты лидарного эхо-сигнала с помощью метода аппроксимаций позволило вычислить коэффициент диффузного ослабления Kd . Рассчитанные значения Kd сопоставлены с данными измерения световых полей на станциях, выполненных в светлое время суток. Построено распределение Kd вдоль маршрута судна.

В проливе Карские ворота была выполнена четырехчасовая станция с целью регистрации возможного прохождения короткопериодных внутренних волн (КВВ). По результатам натурных измерений и данных спутникового зондирования пролив Карские ворота является местом активной генерации КВВ с периодами около десятков минут и амплитудами от нескольких метров до десятков метров [5]. На глубине 11 м наблюдался повышенный градиент показателя ослабления, совпадающий по глубине с хорошо выраженным термоклином. Выполненная по изложенной в [6] методике спектральная обработка данных лидарной съемки позволила выявить квазипериодические структуры в пространственном распределении гидрооптических характеристик, обусловленных КВВ.

Выполненные измерения продемонстрировали эффективность использования судового радиометрического лидара.

Работа была выполнена в рамках государственного задания по теме № FMWE-2021-0014

Список литературы

- 1) Bukin O. A., Major A. Y., Pavlov A. N., Shevtsov B. M., Kholodkevich E. D. Measurement of the lightscattering layers structure and detection of the dynamic processes in the upper ocean layer by shipborne lidar // International Journal of Remote Sensing. 1998. Vol. 19. N. 4. P. 707–715. doi:10.1080/014311698215946
- 2) Zhong, C.; Chen, P.; Pan, D. An Improved Adaptive Subsurface Phytoplankton Layer Detection Method for Ocean Lidar Data // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. N. 3875. <https://doi.org/10.3390/rs13193875>
- 3) Collister, B. L., Zimmerman, R. C., Hill, V. J., Sukenik, C. I., Balch, W. M. Polarized lidar and ocean particles: insights from a mesoscale coccolithophore bloom // Applied Optics. 2020. Vol. 59. N. 15. P. 4650-4662
- 4) Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А. Экспериментальная оценка возможностей лидара ПЛД-1 по регистрации гидрооптических неоднородностей в толще морской среды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 2. С. 41–48. doi:10.7868/S207366731702006X
- 5) Morozov, E. G., Paка, V. T., Bakhanov, V. V. Strong internal tides in the Kara Gates Strait // Geophysical Research Letters. 2008. Vol. 35. N. 16
- 6) Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Жегулин Г.В., Родионов М.А. Комплексная обработка данных лидарной съемки морских акваторий // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 3. С. 27-42. <https://doi.org/10.48612/fpg/26nu-3hte-3n48>

СПОСОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ЛИДАРНЫХ ЭХО-СИГНАЛОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ТОЛЩЕ МОРСКОЙ ВОДЫ

Дерновский В.Л., Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Глитко О.В., Родионов М.А.

Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: морской поляризационный лидар, дистанционное зондирование, гидрооптические характеристики, обработка сигналов.

Проведение лидарной съемки морских акваторий, особенно при размещении лидара на борту самолета, за счет высокой скорости носителя и частоты регистрации позволяет проводить площадную съемку и получать информацию о вертикальной структуре и положениях в пространстве областей повышенных вертикальных градиентов показателя ослабления и светорассеивающих слоев в приповерхностном слое морской воды [1, 2].

Один час лидарной съемки с частотой зондирования 20 – 30 Гц позволяет покрывать такие расстояния, измерения на которых судну потребовалось бы несколько суток. При этом одновременно регистрируются не только лидарные эхо-сигналы, но и пространственные координаты, и углы положения самолета в пространстве. В настоящее время хорошо отработанными являются методики определения положения морского дна при проведении лидарной батиметрии [3]. Метод обработки лидарных сигналов для решения этой задачи заключается в поиске дополнительного максимума на кривой затухания лидарного эхо-сигнала, формирующийся при локации морского дна. Аналогичный метод применяется и для определения положения светорассеивающих слоев [4]. Однако в случае регистрации вертикальных распределений показателя ослабления общепринятого подхода к обработке лидарных эхо-сигналов в настоящее время нет. Во многих случаях к методам и алгоритмам обработки предъявляется дополнительное требование оперативности обработки данных. Например, при регистрации светорассеивающих слоев можно оперативно менять схему полета самолета для более подробного изучения пространственных характеристик регистрируемых неоднородностей в толще воды. При обработке лидарных эхо-сигналов хорошо показали себя метод аппроксимаций и метод спектрального анализа лидарного эхо-сигнала, подробно описанные в [5]. Методы заключаются в анализе амплитуды и формы затухания лидарного эхо-сигнала, несущей в себе информацию о вертикальной структуре показателя ослабления. Целью данной работы является автоматизация обработки не только единичного эхо-сигнала, но и всего массива данных, регистрируемого вдоль трассы зондирования, для определения наличия и положения в пространстве горизонтальных и вертикальных неоднородностей в распределении гидрооптических характеристик.

Для решения этой задачи было предложено использовать такие характеристики сигнала, как значение интеграла зарегистрированного эхо-сигнала, коэффициенты кусочной аппроксимации и положение по глубине точек пересечения аппроксимирующих функций. Аппроксимации выполнялись функцией, вид которой следует из лидарного уравнения [1]. В таком случае каждый однородный участок кривой затухания лидарного эхо-сигнала будет охарактеризован с помощью коэффициентов a и b . Коэффициент a определяется характеристиками лидара, в частности линейно зависит от энергии зондирующего импульса, площади приемной оптики, коэффициента пропускания приемной оптики на длине волны зондирующего излучения, спектральной чувствительности фотоприемника, а также показателя рассеяния назад и др. Коэффициент b – показатель ослабления лидарного сигнала, близкий по своему смыслу к показателю ослабления.

При работе предложенного способа обработки данных лидарного зондирования автоматически для каждого одиночного эхо-сигнала рассчитываются значения a и b на всех участках аппроксимации, координаты точек пересечения аппроксимирующих функций, а затем строятся их

распределения по трассе зондирования. Анализируя полученные распределения вдоль трассы зондирования, можно говорить о наличии или отсутствии неоднородностей в приповерхностном слое морской воды, а также о пространственном изменении гидрооптических характеристик.

Предложенный способ автоматизированной обработки позволяет провести количественный анализ данных лидарного зондирования. Он был применен для сигналов лидарной съемки прибрежных районов Баренцева моря в период цветения кокколитофорид, характеризовавшихся высокой неоднородностью горизонтальных и вертикальных пространственных распределений гидрооптических характеристик.

Работа была выполнена в рамках государственного задания по теме № FMWE-2021-0014.

Список литературы

- 1) Vasilkov A. P., Goldin Yu.A., Gureev B. A., Hoge F.E., Swift R.N., Wright C.W. Airborne polarized lidar detection of scattering layers in the ocean // *Applied Optics*. 2001. Vol. 40. N. 24. P. 4353–4364. doi:10.1364/AO.40.004353
- 2) Churnside J.H., Donaghay P.L. Thin scattering layers observed by airborne lidar // *ICES Journal of Marine Science*. 2009. Vol. 66. N. 4. P. 778–789. doi:10.1093/icesjms/fsp029
- 3) Gao Jay. Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations // *Progress in Physical Geography*, 2009, 33(1), pp. 103–116
- 4) Zhong, C.; Chen, P.; Pan, D. An Improved Adaptive Subsurface Phytoplankton Layer Detection Method for Ocean Lidar Data // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. N. 3875. <https://doi.org/10.3390/rs13193875>
- 5) Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Жегулин Г.В., Родионов М.А. Комплексная обработка данных лидарной съемки морских акваторий // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 3. С. 27–42. <https://doi.org/10.48612/fpg/26nu-3hte-3n48>

ВЕРИФИКАЦИЯ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ВАРИАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ГИДРОСФЕРЫ И ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЗОНДА

Иванов М.П., Долгих С.Г.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы (ЛИВДГ), измеритель скорости звука с датчиком давления и температуры (Зонд), давление гидросферы, морское волнение.

Данная работа направлена на определение значения коэффициента преобразования данных с лазерного измерителя вариации давления гидросферы (ЛИВДГ) [1], получаемых в вольтгах, от глубины погружения, в паскалях. Для этой цели были изучены качественные характеристики волновых процессов, получаемых при регистрации лазерным измерителем вариаций давления гидросферы, в бухтах Японского моря. Для этого в трех бухтах были установлены ЛИВДГ и измеритель скорости звука с датчиком давления и температуры (Зонд) [2]. В результате были получены данные вариаций давления в бухтах залива Петра-Великого Японского моря: бухта Алексеева (о. Попова), бухта Улисс (южное побережье г. Владивостока) и в бухте Витязь залива Посыет Японского моря. В бухте Алексеева измерительные приборы были на глубине 8 метров на протяжении 3 часов 15 минут, бухте Улисс на глубине 7 метров на протяжении 75 часов, в бухте Витязь на глубине 5 метров на протяжении 20 часов 15 минут.

Натурные записи вариаций давления гидросферы производились в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц с точностью 50 мкПа. Данные были сформированы в файлы длительностью один час. Для сопоставления натурных данных ЛИВДГ и Зонда часовые файлы были подвергнуты предварительной обработке. Они были отфильтрованы низкочастотным фильтром с окном Хэмминга длиной 3000, объединены и продецимированы с усреднением, до частоты равной частоте работы Зонда.

На синхронных участках записи приборов были выбраны участки с максимальной корреляцией, что позволяет более качественно совместить данные ЛИВДГ и Зонда. Было рассмотрено морское волнение по записям этих приборов в каждой точке постановки. Выделялись участки записей приборов с периодами морского волнения от нескольких секунд до минут. На основе обработанных данных было получено среднее значение отношения данных ЛИВДГ к данным Зонда и построена зависимость полученных данных от глубины установки.

Работа выполнена в лаборатории Нелинейной гидрофизики и природы катастроф ТОИ ДВО РАН по соглашению № 075-15-2022-1127 от 1 июля 2022 г.

Список литературы

- 1) Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Швец В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы // Приборы и техника эксперимента. 2005. №6. С.56-57
- 2) MiniSERIES Operating Manual miniCTD, miniSVP & miniTIDE // 0660880d, 2019 Valeport Ltd.

ФИЛЬТРАЦИЯ ВЫБРОСОВ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Касаткин А.Я.¹, Криницкий М.А.^{1,2}, Гулев С.К.²

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: Машинное обучение, модель, метод, идентификация аномалий.

Современные высокочастотные измерения характеризуются наличием выбросов (аномалий), часть из которых существенно влияет на качество оценки агрегированных параметров среды. Примером натуральных наблюдений такого рода могут служить измерения солености поверхности океана, скорости и направления течений, скорости и направления ветра, концентрации парниковых газов и другие физические величины. При этом вычисление агрегированных параметров среды, таких как потоки солености или потоки газовых примесей производится с применением предварительной фильтрации выбросов. В настоящее время отсев выбросов производится с применением сложного сочетания эмпирически настраиваемых примитивных фильтров, что зачастую приводит к существенному снижению объема полезных данных. В то же время современные методы машинного обучения предоставляют расширенные возможности адаптивной и гибкой идентификации аномалий с повышенной точностью по сравнению с классическими статистическими фильтрами.

В настоящем исследовании предлагается решать задачу фильтрации аномалий с помощью методов машинного обучения. Основной сложностью в таком подходе становится отсутствие обучающей выборки для применения методов контролируемого обучения (supervised learning). В то же время, даже в случае наличия обучающей выборки, суть аномалий как чрезвычайно редких объектов, приводит к проблеме сильно несбалансированной выборки для обучения бинарного классификатора. В связи с этим в настоящем исследовании предлагается применять методы «обучения без учителя» (unsupervised learning), а именно методы идентификации аномалий.

В настоящем исследовании мы разрабатываем подход фильтрации выбросов для данных натуральных высокочастотных измерений концентрации CO₂, водяного пара и вертикальной компоненты скорости ветра, получаемых на станции оценки потоков парниковых газов, находящейся на территории Чеченского карбонового полигона, методом ковариации турбулентных пульсаций (далее ковариационная станция). В качестве исходных данных используются показания, записанные в виде 48 файлов по 30 мин (в общей сложности 1 день), каждый из которых содержит 36000 измерений с интервалом 0.05 секунды. В данных содержится информация о приборе, времени и анализируемых параметрах среды. Под аномалиями (идентифицируемыми объектами) понимаются точки, которые не укладываются в общий тренд или закономерность, наблюдаемую на существенном (более 3-5 секунд) интервале измерений.

Предлагаемый метод поиска аномалий заключается в прогнозировании временных рядов с помощью моделей машинного обучения и дальнейшего сравнение ошибки спрогнозированных временных рядов с реальными значениями. Далее происходит отсеивание наиболее больших ошибок, а отсеянные значения принимаются за аномалии. Для оценки меры качества модели, результаты её работы сравниваются с размеченными данными, предлагаемая мера качества – f-score.

За опорные методы предлагается взять метод авторегрессии ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) и константные методы (либо все точки не аномалии, либо все аномалии, либо усредненный рандомизированный метод).

Другими классическими методами машинного обучения является метод с использованием библиотеки Catboost, на основе модели Random Forest. Также метод с использованием модели LSTM

и другие, использующие нейронные сети: многослойный перцептрон.

Мы покажем результаты сравнения моделей машинного обучения в нашем исследовании и продемонстрируем на графиках выделенные в результате работы модели и разметки аномалии.

Перспективы исследования:

Реализация метода на основе генеративных-состязательных нейронных сетей и идентификация точек смены режима – точек, которые разделяют два тренда поведения временного ряда.

Список литературы

- 1) Бурба Г.Г. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство / Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авилов В.К., Мамкин В.В. // ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, 2016. - 223
- 2) Charu C. Aggarwal Outlier Analysis / Charu C. Aggarwal // Springer New York Heidelberg Dordrecht London. – New York, 2013. - 446

ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ РЕЗОНАНСНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ЭКСПРЕСС ОЦЕНКИ СОЛЕННОСТИ ВОДЫ

Полетаев Д.А., Соколенко Б.В.

Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, г. Симферополь

Ключевые слова: датчик, свч, резонатор, соленость морской воды.

Соленость водоемов – актуальный показатель, который требует прецизионного измерения для различных водных сред. Анализ растворов такого плана актуален для морей, океанов, водоемов хозяйственного назначения [1]. Повсеместно применяются гравиметрические, кондуктометрические методы анализа содержания солей. Однако гравиметрические методы весьма длительны по времени и приблизительны по содержанию. Кондуктометрические методы экспрессны, однако требуют дополнительного обслуживания в плане оценки степени окисления элементов датчиков (коррозия). Поэтому требуются современные экспрессные методы оценки качественного и количественного состава воды.

В настоящее время ближнеполевые СВЧ методы диагностики находят применение в науке, технике и хозяйстве. Их перспективность обусловлена неразрушаемостью контрольных объектов, отсутствием физического контакта, возможностью получения экспресс-данных при проведении исследований [2]. Данный класс приборов позволяет количественно анализировать диэлектрические среды за счет измерения электрофизических параметров: относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь. Неотъемлемой составляющей СВЧ датчиков являются резонансные измерительные преобразователи, конструкции которых определяются областью использования. Наибольшее распространение получила конструкция резонансного измерительного преобразователя с коаксиальной измерительной апертурой. Информационные сигналы такого устройства (добротность Q , частота f и их изменение ΔQ , Δf) однозначно связаны с электрофизическими параметрами исследуемого объекта [2].

Целью работы является предложение и анализ применимости резонансного измерительного преобразователя с коаксиальной апертурой для оценки солености воды.

Конструкция рассматриваемого резонаторного измерительного преобразователя включает: отрезок коаксиального волновода, среду с соответствующими электрофизическими параметрами. Для проведения практических измерений актуально, чтобы электрофизические параметры среды оказывали как можно большее влияние на информационные сигналы преобразователя. Из теории коаксиальных линий передач известно, что минимальный коэффициент затухания в коаксиальной линии достигается при отношении радиусов 0,28. Очевидно, максимальная добротность четверть-волнового резонатора будет также достигаться при данном отношении. Для анализа применимости резонаторного измерительного преобразователя для оценки солености воды использовалась численная модель с применением метода конечных элементов [2].

Из общих физических представлений следует, что радиус апертуры существенно изменяет добротность резонансного измерительного преобразователя. Характер изменения добротности носит резонансный характер. Более острый резонансный пик соответствует меньшему значению добротности, что согласуется с общими физическими представлениями. Уменьшение резонансной частоты обуславливается ростом емкости апертуры, при увеличении ее продольного размера апертурно-формирующей части коаксиала.

Подбор геометрических параметров резонансного преобразователя должен быть выполнен таким образом, чтобы его добротность преобразователя при исследовании соленой воды оставалась довольно высокой даже при значительных раскрывах апертуры, что, в свою очередь, гарантирует

высокую чувствительность датчика. Вместе с тем, даже при малых радиусах апертуры, изменение добротности может быть довольно значительным. Это связано со значительным провисанием поля из апертуры в среды с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости.

Целесообразно предусмотреть возможность исследования широкого диапазона солености воды. Количественно это может характеризоваться изменением относительной диэлектрической проницаемости от 3 до 10 и тангенса угла потерь от 0,01 до 0,4. Таким образом, численный расчет целесообразно проводить в данном диапазоне изменения электрофизических параметров. Эти данные применены для оптимизации геометрических размеров резонансного преобразователя. В итоге получены оптимальные значения соотношений радиусов коаксиальной апертуры – 0,4; соотношение внутреннего и наружного радиусов коаксиального резонатора – 0,28; соотношение высоты коаксиального резонатора к длине волны – 1,25. При этом чувствительность к изменению тангенса угла диэлектрических потерь, как наиболее характерного параметра для анализа солености воды, составляет 0,22. Оценочно, такой датчик может применяться для измерения солености воды от 0 до 70‰ с точностью не менее 0,1%.

Процесс оценки солености воды на предлагаемом приборе может осуществляться по следующей методике:

1. Предварительная градуировка датчика по растворам с известным содержанием солей. В данном процессе производится сопоставление значения добротности датчика показателю солености воды.

2. Определение параметров материалов. При этом СВЧ резонансный измерительный преобразователь осуществляет контроль текущего значения солености воды по предварительным градуировочным данным добротности.

В работе предложен прецизионный датчик солености воды, проведена оптимизация геометрических размеров. Данный прибор отличается высокой чувствительностью, широким диапазоном измерений концентраций солей, экспрессностью, надежностью и стойкостью к коррозии. По оценкам время измерения составляет не более 0,1с. Точность – на уровне 2%.

Список литературы

- 1) Derraik J.G.B. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review // *Mar. pollut. bull.* – 2002. – Vol. 44. – p. 842–852.
- 2) Гордиенко Ю.Е. Вклад колебательных и излучательных потерь в характеристики СВЧ преобразователей с коаксиальной измерительной апертурой / Ю.Е. Гордиенко, Ю.И. Гуд, Д.А. Полетаев // *Радиотехника.* – 2009. – № 157. – с. 108 – 114.

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКЕАНА

Пономаренко А.А.^{1,2}, Разумов Д.Д.¹, Салин М.Б.¹

¹ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

² Лаборатория алгоритмов и технологий анализа сетевых структур, Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, г. Нижний Новгород

Ключевые слова: гидроакустика, обработка сигнала, машинное обучение, поиск аномалий.

В последнее время методы машинного обучения стали активно проникать в область акустики океана и применяться к обработке акустических сигналов. Одной характерной и достаточно важной задачей является детектирование сигнала в звуковом потоке на фоне шума. Автоматизация процесса позволяет сократить время на обработку сигналов, оставляя для анализа человеку только фрагменты аудиозаписей, содержащие полезную для исследователей информацию. Данную задачу можно решать классическими методами, задавая вручную набор правил, условий срабатывания триггера появления события в звуковом потоке. Также эту задачу можно решать с помощью методов машинного обучения, формируя набор правил автоматически используя размеченные данные. Состоятельность такого подхода мы продемонстрировали на задаче детекции звуков морских млекопитающих в звуковом потоке. В качестве набора данных были использованы записи звуков Северного гладкого кита, собранные коллегами из института Мориса Ламонтана в заливе Святого Лаврентия [1]. В результате нам удалось построить систему, способную с точностью (precision) 90% и значением покрытия 71% (recall) определять наличие звука млекопитающего в 3-секундном звуковом фрагменте [2].

В качестве признаков, подаваемых на вход алгоритму машинного обучения, использовались следующие числовые характеристики сигнала: значение спектрального центроида, величина спектрального спуска, ширина спектральной полосы, частота пересечения нуля, кепспектральные коэффициенты, вектор хромограммы.

Другой задачей, в которой мы успешно применили машинное обучение – задача определения высоты, частоты и направления поверхностных волн на основе отраженного тонального звукового сигнала, излучаемого на глубине. В данном случае большой вклад в успех дал удачный выбор входных признаков, которые извлекались из звукового сигнала и подавались на вход алгоритму машинного обучения. Мы использовали следующие признаки, вычисленные для каждого из 13 направлений:

- (1,2) sk_{le-1} и sk_{ri-1} [дБ/Гц] – наклон спектра (коэффициент для аппроксимации полинома первой степени методом наименьших квадратов в доплеровском диапазоне частот $[-1.75; -0.75]$ или $[0.75; 1.75]$) для отрицательных и положительных доплеровских частот соответственно;
- (3,4) sk_{le-2} и sk_{ri-2} [дБ/Гц] – те же характеристики, что и (1,2), но рассчитанные в более удаленном диапазоне частот ($[1.5; 3.2]$ для несущей частоты 2 кГц)
- (5,6) $centr_1$ и $centr_2$ [Гц] – средневзвешенная средняя и медианная средняя частоты, соответственно;
- (7,8) $lv_{brag-le}$ и $lv_{brag-ri}$ [дБ] – уровни сигнала в диапазоне 1 Гц вокруг частоты Брэгга ($-2 \pm 0,5$ Гц и $2 \pm 0,5$ Гц, соответственно);
- (9) lvl [дБ] – общий уровень обратно рассеянного сигнала.

В результате нам удалось собрать систему позволяющую определить значение пиковой частоты с ошибкой не превосходящей 16% [3].

Третьей задачей, где мы успешно применили машинное обучение для обработки отраженного звукового сигнала – это задача определения скорости и направления поверхностного течения. Взяв тот же набор признаков, что был использован в задаче определения высоты поверхностных

волн, мы получили значения метрики MAPE порядка 70%. В данном случае этот результат можно рассматривать в качестве промежуточного. Высокое значение MAPE объясняется, наличием большого числа около нулевых значений.

В качестве модели машинного обучения во всех 3-х случаях мы использовали, хорошо себя зарекомендовавший в соревнованиях по машинному обучению, алгоритм экстремального градиентного бустинга [4], который представляет собой ансамбль деревьев решений.

Данные для последних двух задач были собраны нами в ходе натурального эксперимента, проводимого на океанографической платформе РАН в Крыму осенью в 2021 году.

Работа поддержана грантом РФФ № 20-77-10081 и госзаданием №0030-2021-0017.

Список литературы

- 1) Kirsebom O. S. et al. Performance of a deep neural network at detecting North Atlantic right whale upcalls //The Journal of the Acoustical Society of America. – 2020. – Т. 147. – №. 4. – С. 2636-2646
- 2) Salin M., Ponomarenko A. Marine mammal calls detection in acoustic signals via gradient boosting model //Proceedings of Meetings on Acoustics UACE. – Acoustical Society of America, 2021. – Т. 44. – №. 1. – С. 010001
- 3) Ermoshkin A. V. et al. Surface waves prediction based on long-range acoustic backscattering in a mid-frequency range //Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Т. 10. – №. 6. – С. 722
- 4) Chen T., Guestrin C. Xgboost: A scalable tree boosting system //Proceedings of the 22nd acm sigkdd international conference on knowledge discovery and data mining. – 2016. – С. 785-794

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКОЛОГИИ ЗИМНЕГО ЗООПЛАНКТОНА ОЗЕРА БАЙКАЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ

Ржепка Т.П.¹, Наумова Е.Ю.²

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск

²Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск

Ключевые слова: голографическая камера, зоопланктон, озеро Байкал, экология, дистанционные методы.

Являясь частью глобальной экосистемы, озеро Байкал уже сталкивается с воздействием изменения климата, которое, в свою очередь, увеличивает риски и последствия местных антропогенных воздействий. Хотя Федеральный закон от 1 мая 1999 г. N 94-ФЗ «Об охране озера Байкал» предусматривает определенные требования к деятельности человека в центральной зоне, тем не менее, негативное воздействие на его экосистему все возрастает.

Нужно отметить так же, что политические, экономические и социальные факторы в комплексе, и каждый по отдельности, приводят к каскадным природным последствиям в области качества воды, устойчивости прибрежной зоны, поглотителей загрязнений, управления уровнем воды, сохранения лесов, борьбы с пожарами и биоразнообразия [1].

Зоопланктон – наиболее мобильный (в смысле скорости реакции) индикатор процессов, происходящих в водной экосистеме. Это тот трофический уровень, который первым ощущает любые изменения, поэтому мониторинг планктона, диагностика изменений и установление причин экологической динамики, может иметь самостоятельное значение для построения систем предупреждения [2].

Актуальность темы исследования связана с необходимостью получения информации, объективно отражающей состояние зоопланктона в различных частях акватории озера Байкал, в том числе в регионах интенсивного антропогенного воздействия, которые сейчас расширяются за счет промышленного, туристского и других видов освоения [3]. От оперативности получения данного вида информации зависит не только локальный уровень выявления проблем и их возможное предупреждение, но и глобальный акцент на определенных этапах развития экосистемы в целом. Основная цель исследования состоит в оценке и анализе возможности применения погружной голографической установки для целей дистанционного наблюдения за динамикой планктона зимой.

Именно голографическая камера позволяет выявить микрослои с повышенной концентрацией планктона, которые невозможно определить с помощью других методов (планктонные сети, батометры). Использование этих данных поможет расширить наши знания об экологии планктона озера Байкал и спрогнозировать изменения, которые могут происходить не только в ближайшее время, но и в более далекой перспективе.

Исследовательские полевые работы проводились 14 – 15 марта 2019 года в южной котловине озера в 3.5 км от мыса Ивановский. При полевых исследованиях использованы кроме классических методов изучения экологии зоопланктона – сети Джели и CTD зонда, также, гидроакустические датчики, погружная голографическая камера, термодатчики высокого разрешения. Температуру воды, хлорофилл, фотосинтетически активную радиацию и другие параметры измеряли зондом AAQ-Rinko. Наблюдения проводились каждые 4 часа на протяжении суток. Пробы мезозоопланктона отбирали закрывающейся сетью Джели с размером ячеек 88 мкм (открытый диаметр 37.5 см) по горизонтам 0–10, 10–25, 25–50, 50–100 м. В результате обработано 27 планктонных проб. Были получены профили количества частиц с помощью погружной голографической камеры

Сопоставление состава и численности зоопланктона с ранее полученными данными показали, что на всех глубинах доминировали науплиусы *Epischura baikalensis*, причем численность науплиусов на глубине 0-10 м сильно варьирует в зависимости от времени суток. В дневное время

их число у поверхности практически вдвое превышает ночное. На глубине 10-25 м численность науплиусов увеличивается именно в ночное время. Глубже этих отметок суточная динамика не так явна.

Максимум мезозoopланктона также был зарегистрирован и в акустических, и в голографических данных на глубине около трех метров. Максимум фотосинтезирующих организмов наблюдался над термоклином и отражен в данных голографической камеры на глубине 23 м. Экспериментальные результаты, которые получены с использованием комплексных методов сбора показывают, что распределение в толще воды мезопланктона очень тесно связано с гидрографическими показателями. В первую очередь – это температура и плотность воды, далее – освещенность и различные динамические процессы [4].

В связи с этим, технику для применения в дистанционных исследованиях зоопланктона необходимо развивать для дальнейшего использования. Дистанционные методы исследований сейчас выходят на первый план и это позволит автоматизировать весь процесс мониторинга не только озера Байкал, но и других водоемов, а также позволит сделать наблюдения более широкомасштабными. Считаем, что голографическая камера – это один из путей к успеху данного мероприятия.

Работа выполнена при поддержке проекта МИНОБРНАУКИ России 0279-2021-0005 «Исследование трансформаций состояния водоемов и водотоков Восточной Сибири в сезонных и долгосрочных аспектах в контексте изменений климата, геологической среды и антропогенных нагрузок».

Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск.

Список литературы

- 1) Brown, K. P. Human impact and ecosystemic health at Lake Baikal / K. P. Brown [et al] // WIREs Water, 8(4) – 2021. P. 1-36. – URL: <https://doi.org/10.1002/wat2.1528> (дата обращения 22.12.2022)
- 2) Lombard F. Globally consistent quantitative observations of planktonic ecosystems/ F. Lombard // Front. Mar. Sci. 2019. V. 6. № 196. P. 1-21
- 3) Аров И. В. Современное состояние изученности и пути генезиса фауны коловраток (Rotifera) озера Байкал / И. В. Аров, Е. А. Мишарина // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология, –2018. – Т. 25. – С. 70-90
- 4) Наумова Е.Ю. Исследование экологии зимнего планктона озера Байкал с использованием комплексных инструментальных методов / Е. Ю. Наумова [и др.] // Юг России: экология, развитие. – 2021. – Т. 16. – № 3(60). – С. 59-67

СУТОЧНЫЕ МИГРАЦИИ ТРЁХИГЛОЙ КОЛЮШКИ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ: АНАЛИЗ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Ташбаев Д.У.¹, Садиев С.А.², Иванова Т.С.¹, Иванов М.В.¹, Лайус Д.Л.³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск

³ Независимый исследователь

Ключевые слова: трёхиглая колюшка, миграции, видеокамеры, искусственный интеллект, Белое море.

Климатические изменения в Арктике протекают значительно быстрее, чем в других регионах планеты [1]. В связи с повышением температуры в северных регионах, открываются новые возможности для их освоения и, соответственно, необходимость их изучения. Трёхиглая колюшка (*Gasterosteus aculeatus* L.) как самый массовый вид Белого моря, может служить индикатором, свидетельствующим об изменениях в экосистеме. Целью данной работы является изучение миграции и распределения трёхиглой колюшки в прибрежной зоне Кандалакшского залива Белого моря с помощью автоматического анализа видеоизображений.

Материал был собран в 2021 г. недалеко от морской биологической станции (МБС) СПбГУ «Беломорская» в бухте Юшковка о. Средний Кандалакшского залива Белого моря. Первая серия съёмки проходила с 14 по 16 июня. Для сбора материала использовались камеры интервальной съёмки Brinno TLC200 Pro и экшн камеры GoPro 3&4. Всего было 5 станций в пределах бухты: две станции располагались по периферии на глубинах -0,7 м (от уреза воды в малую воду), три станции были установлены в центре и образовали разрез на глубинах -0,5 м, 0 м (урез воды в малую воду) и +0,5 м. На каждой станции устанавливалось по одной камере Brinno и по одной камере GoPro. Каждая камера Brinno снимала в течение 2-3 суток с интервалом между кадрами 5 сек, камеры GoPro снимали на протяжении 1,5-2 часов.

Для определения расстояния рыбы до объектива камеры размер рыб принимался за 6,1 см (средняя длина рыб). Это было возможно в связи с низкой изменчивостью длины взрослой колюшки на нерестилищах и позволяло достаточно точно определить расстояние рыбы до камеры. По расстоянию рыбы до камеры определяли их плотность в каждом горизонте воды и общую плотность, т.е. численность на единицу площади.

Перед обработкой видео предварительно нарезалось на отдельные кадры. Видео с экспозицией 24 часа в среднем содержит 17 000 кадров. Станция №2 (урез воды) содержала примерно 34 000 кадров. В дальнейшем, мы воспользовались архитектурой YOLOv4-tiny [2], которая показала высокую точность детекции объекта при тестовых запусках [3]. После обработки материала со станции №2 мы получили 43 838 изображений рыб. Максимальное среднее число колюшек в кадре, как правило, наблюдалось близко ко времени полной воды. Однако в некоторых случаях численность рыб увеличивается и в момент отлива. Это может свидетельствовать о массовом приходе и уходе колюшки в приливно-отливные периоды. Преимущественно особи держатся на глубинах 1-2 м. Численность в периоды максимумов, то есть примерно в полную воду, составляет 0,3-1,7 рыб на кв.м.

Направление движения колюшки определялось вручную по кадрам, полученным с камер Brinno. На станции №2, располагающейся в куту бухты, на протяжении всей серии съёмки не наблюдалось чёткой закономерности в преобладающем направлении движения рыб.

Полученный материал свидетельствует о том, что численность колюшки меняется во время прилива и отлива, также она различается от цикла к циклу, возможно это связано с погодными условиями (в частности, с ветром). Можно предположить, что миграции колюшки в полную воду к урезу воды связаны с питанием, а также с поиском нерестилищ, поскольку очень часто можно встретить нерестилища трехиглой колюшки выше уреза воды в малую воду, т.е. в литоральных ваннах, которые хорошо прогреваются и обеспечивают подходящие условия для нереста и выращивания потомства.

Таким образом, нам удалось получить новые данные о суточной динамике трёхиглой колюшки в пределах небольшой бухты Белого моря: с приливом колюшка подходит к берегу, по видимому, для питания и поиска подходящих мест для нереста.

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ 22-24-00956 «Обычная, но неизвестная рыба: девятииглая колюшка *Pungitius pungitius* L. Белого и Балтийского морей - популяционные характеристики и роль в экосистеме». Авторы выражают благодарность администрации УНБ СПбГУ «Беломорская» за возможность научной работы на Белом море.

Список литературы

- 1) Воздействие изменения климата на российскую Арктику: анализ и пути решения проблемы. WWF России. – М., 2008. С.27
- 2) Bochkovskiy A, Wang C, & Liao H.M. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. - 2020. - ArXiv, abs/2004.10934
- 3) Ташбаев Д.У, Садиев С.А, Надточий Е.В, Генельт-Яновский Е.А, Демчук А.С, Иванова Т.С, Иванов М.В, Лайус Д.Л. Использование видеорегистрации для изучения рыб: автоматический подсчет трехиглой колюшки на видеоизображениях в прибрежной зоне Белого моря. // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Арктические экосистемы: сохранение и устойчивое развитие». – Мурманск: МАГУ. 2021. С. 137-143

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ БЕЛУХ И АФАЛИН

Тышко А.А., Шатравин А.В., Криницкий М.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва.

Ключевые слова: гидроакустика, акустические сигналы морских млекопитающих, детектирование акустических сигналов, нейронные сети.

Обнаружение морских млекопитающих (ММ) по издаваемым ими акустическим сигналам часто составляет важный этап комплексного мониторинга состояния популяций животных и существенно дополняет, а иногда и заменяет, прямые наблюдения. Яркими примерами видов, для которых характерна активная вокализация, являются Белуха и Афалина [1, 2]. Наиболее распространенным способом обнаружения этих животных по их акустическим сигналам является пассивный акустический мониторинг (ПАМ), который позволяет получить необходимый материал для анализа изменений состояния экосистем и миграционного поведения животных. Одной из проблем ПАМ является большой объем получаемых данных, что в свою очередь не позволяет проанализировать его вручную даже подготовленному эксперту. В связи с этим возникает потребность разработки автоматических средств обнаружения сигналов. В последние годы наблюдается рост исследований о возможности применения искусственных нейронных сетей глубокого обучения для решения этой задачи [5, 6].

Наша работа заключалась в создании алгоритмов детектирования акустических сигналов зубатых китообразных, работу которых мы тестировали на данных из открытого источника (http://www.mobysound.org/workshops_p2.html), содержащих аудиозаписи с сигналами афалин и с их разметкой (3208 сигналов), составленной человеком-экспертом. Все файлы были преобразованы в спектрограммы, которые затем были отфильтрованы в диапазон от 5 до 45 кГц и на которые была аппроксимирована исходная разметка. Также аудиозаписи были разделены на обучающую, валидационную и тестовую группы (выборки).

В качестве базовых методов были взяты энергетические алгоритмы, описанные в работе Erbe и King в 2008 г. [3]. Результатом их работы является список классифицированных временных интервалов, где класс с меткой «1» соответствует наличию сигнала в данном промежутке, а класс с меткой «0» - отсутствию. Эти алгоритмы обладают рядом гиперпараметров, для подбора которых использовались обучающая и валидационная выборки.

В роли основного алгоритма мы использовали нейросеть ResNet152 [4], предобученную на данных ImageNet, которую мы обучали для выполнения задачи оценки доли сигнала во входном окне (в изображении, являющимся спектрограммой заданной по времени ширины). При этом ширина окна варьировалась от батча к батчу (небольшая группа изображений) в диапазоне от 0.075 секунд до 1 секунды. Также для представленной нами модели были подобраны способы искусственного дополнения данных (аугментации), позволяющие повысить устойчивость метода к шумам и выбросам в данных. Для обучения и настройки гиперпараметров, как и в случае с базовыми алгоритмами, использовались обучающая и валидационная выборки.

Для достоверного сравнения предлагаемого алгоритма с опорным был проведен перевод результата оценки доли сигнала в окне к бинарному виду, отражающему признак наличия сигнала. Для этого мы применили пороговый подход, при котором для доли сигнала, превышающей определенный порог, считается, что в окне есть сигнал, и наоборот. С применением этого подхода была получена модельная разметка тестовой выборки. Алгоритмы оценивались сравнением с референсной (экспертной) разметкой с использованием мер качества Точность (Precision), Полнота (Recall), площадь под ROC-кривой (ROC-AUC) и F1-score. Из всех алгоритмов на тестовой выборке лучшее качество показала представленная в настоящем исследовании искусственная

нейронная сеть. Базовые алгоритмы также были запущены на записях длиной в несколько дней, содержащих сигналы беломорских белух, сделанных сотрудниками лаборатории морских млекопитающих, в результате чего были получены представления о промежутках времени, в которых наблюдалась акустическая активность животных. Применение алгоритмов позволило сэкономить время сотрудников на обработку этих записей вручную, а также определить факт присутствия животных в акватории, в которой проводился акустический мониторинг.

Список литературы

- 1) Caldwell M. C., Caldwell D. K. The whistle of the Atlantic bottlenosed dolphin (*Tursiops truncatus*)—ontogeny //Behavior of marine animals. – Springer, Boston, MA, 1979. – С. 369-401.
- 2) Беликов Р.А., Белькович В.М., 2006. Акустический репертуар беломорских белух (*Delphinapterus leucas*) Соловецкого стада в репродуктивном скоплении. С. 299-337. Из: Фундаментальные исследования океанов и морей: в 2 кн / Ред. Лаверов Н.П. М.: Наука.
- 3) C. Erbe and A. R. King: Marine mammals detection using entropy. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 124, No. 5, November 2008
- 4) Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun: Deep Residual Learning for Image Recognition 2015
- 5) Kohlsdorf D., Herzing D., Starner T. An Auto Encoder For Audio Dolphin Communication //2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). – IEEE, 2020. – С. 1-7
- 6) Yu S. et al. Deep neural networks for automated detection of marine mammal species //Scientific Reports (Nature Publisher Group). – 2020. – Т. 10. – №. 1