

Статистическая климатология: современные достижения и новые идеи (Научные чтения памяти Георгия Вадимовича Груза)

*Э.Я. Ранькова³⁾, Г.В. Алексеев¹⁰⁾, М.А. Алешина⁵⁾, К.Д. Бабина⁵⁾,
М.Ю. Бардин³⁾, А.И. Бедрицкий²⁾, Р.М. Вильфанд⁸⁾, Е.П. Гордов^{13,14)},
С.К. Гулев⁴⁾, А. Дюфур⁴⁾, О.Г. Золина⁴⁾, Д.Б. Киктёв⁸⁾, А.В. Кислов¹¹⁾,
В.Н. Крыжов⁸⁾, Н.Е. Куксова¹¹⁾, А.С. Лавров⁷⁾, И.И. Мохов^{11,12)},
Ю.П. Переведенцев⁸⁾, Т.В. Платова³⁾, А.А. Романовская³⁾, Ю.Л. Рудакова⁶⁾,
О.Ф. Самохина³⁾, В.А. Семенов⁵⁾, С.М. Семенов³⁾, В.В. Соколов¹⁾,
А.М. Стерин⁷⁾, В.М. Хан⁸⁾, Е.И. Хлебникова⁶⁾, Е.А. Черенкова⁵⁾,
К.М. Шанталинский⁸⁾, Б.Г. Шерстюков⁷⁾, И.М. Школьник⁶⁾*

¹⁾Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Россия, 123242, Москва, Нововаганьковский пер., д. 12

²⁾Российское гидрометеорологическое общество, Россия, 123376, г. Москва, Большой Предтеченский пер., д. 7

³⁾Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б

⁴⁾Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, 117997, г. Москва, Нахимовский пр., д. 36

⁵⁾Институт географии РАН, Россия, 109017, Москва, Старомонетный пер., 29

⁶⁾Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7

⁷⁾Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных, Россия, 249035, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королева, д. 6

⁸⁾Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Россия, 123376, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, строение 1

⁹⁾Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18

¹⁰⁾Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Россия, 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38

¹¹⁾Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

¹²⁾Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Россия, Москва, Пыжевский пер., д. 3

¹³⁾Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, д. 10/3

¹⁴⁾Томский филиал Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий, 634055, г. Томск, пр. Академический, д. 4

Реферат. Изменения климата Земли, особенно интенсивно проявившиеся с 1970-х годов, поставили перед климатологией новые вопросы, выдвинув на первый план проблему изменчивости климата (включая аспекты его экстремальности) в условиях тренда средних значений (норм) метеорологических величин. Возникла острая потребность в усовершенствованных методах выявления трендов (вообще говоря, нелинейных) и атрибуции наблюдаемых климатических изменений, что невозможно без применения математических моделей климата и земной системы в целом. Дальнейшее развитие науки о климате требует также применения современных информационных технологий для создания цифровых двойников объектов земной системы. Все эти проблемы были предметом рассмотрения на Научных чтениях памяти Георгия Вадимовича Груза, выдающегося отечественного климатолога, которые прошли 10 ноября 2021 г. в Москве.

Ключевые слова. Статистическая климатология, изменение климата, климатические экстремумы, модели, вероятностные оценки, риски, адаптация.

Statistical climatology: modern achievements and new ideas (Scientific readings in memory of G.V. Gruza)

*E.Ya. Rankova³⁾, G.V. Alekseev¹⁰⁾, M.A. Aleshina⁵⁾, K.D. Babina⁵⁾, M.Yu. Bardin³⁾,
A.I. Bedritskiy²⁾, R.M. Vilfand⁸⁾, E.P. Gordov^{13, 14)}, S.K. Gulev⁴⁾, A. Dufour⁴⁾,
O.G. Zolina⁴⁾, D.B. Kiktev⁸⁾, A.V. Kislov¹¹⁾, V.N. Kryzhov⁸⁾, N.E. Kuksova¹¹⁾,
A.S. Lavrov⁷⁾, I.I. Mokhov^{11,12)}, Yu.P. Perevedentsev⁸⁾, T.V. Platova³⁾,
A.A. Romanovskaya³⁾, Yu.L. Rudakova⁶⁾, O.F. Samokhina³⁾, V.A. Semenov⁵⁾,
S.M. Semenov³⁾, V.V. Sokolov¹⁾, A.M. Sterin⁷⁾, V.M. Khan⁸⁾, E.I. Khlebnikova⁶⁾,
E.A. Cherenkova⁵⁾, K.M. Shantalinskiy⁸⁾, B.G. Sherstyukov⁷⁾, I.M. Shkolnik⁶⁾*

¹⁾Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environmental Monitoring,
12, Novovagankovskiy lane, 123242, Moscow, Russian Federation

²⁾Russian Hydrometeorological Society,
7, Bolshoy Predtechensky lane, 123376, Moscow, Russian Federation

³⁾Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

⁴⁾P.P. Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy Avenue, 117997, Moscow, Russian Federation

⁵⁾Institute of Geography Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny lane, 109017, Moscow, Russian Federation

⁶⁾Main Geophysical Observatory named after. A.I. Voeikova,
7, Karbysheva str., 194021, St. Petersburg, Russian Federation

⁷⁾All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center,
6, Queen str., 249035, Kaluga region, Obninsk, Russian Federation

⁸⁾Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation,
13, building 1, Bolshoi Predtechensky lane, 123376, Moscow, Russian Federation

⁹⁾Kazan (Volga Region) Federal University,
18, Kremlin str., 420008, Kazan, Russian Federation

¹⁰⁾Arctic and Antarctic Research Institute,
38, Bering str., 199397, St. Petersburg, Russian Federation

¹¹⁾M.V. Lomonosov Moscow State University,
1, building 2, Leninskiy gory, GSP-1, 119991, Moscow, Russian Federation

¹²⁾A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences,
3, Pyzhevskiy lane, 119017, Moscow, Russian Federation

¹³⁾Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences,
10/3, Akademicheskoy Avenue, 634055, Tomsk, Russian Federation

¹⁴⁾Tomsk branch of the Federal Research Center for Information and Computing Technologies,
4, Akademicheskoy Avenue, 634055, Tomsk, Russian Federation

Abstract. Changes in the Earth's climate, which have been especially intense since the 1970s, have posed new questions for climatology, bringing to the fore the problem of climate variability (including aspects of its extremeness) under the trend of average values (norms) of meteorological values. There was an urgent need for improved methods for revealing trends (generally speaking, non-linear) and attributing observed climate changes, which is impossible without the use of mathematical models of climate and the earth system as a whole. There was an urgent need for improved methods for revealing trends (generally speaking, non-linear) and attributing observed climate changes, what is impossible without the use of mathematical models of climate and the earth system as a whole. Further development of climate science also requires the use of modern information technologies to create digital twins of the Earth system objects. All these problems were the subject of consideration at the Scientific Readings in memory of Georgy Vadimovich Gruza, an outstanding domestic climatologist, which were held on November 10, 2021 in Moscow.

Keywords. Statistical climatology, climate change, climate extremes, models, probabilistic estimates, risks, adaptation.

Введение

Последние 50 лет были периодом интенсивного развития климатологии – классической области наук о Земле. Традиционно климатологи занимались обобщением данных гидрометеорологических наблюдений (станционных, судовых, зондовых) во времени и пространстве. Целью этих обобщений было получение статистических характеристик климата в различных пространственных масштабах – локальном, региональном, континентальном, глобальном. Согласно традиционным представлениям, чем более продолжительными были ряды наблюдений в распоряжении исследователей, тем более точными были получаемые ими статистические оценки параметров климата – математических ожиданий гидрометеорологических величин, их дисперсий, корреляций и пр.

Эти традиционные представления потребовали существенной ревизии в последние 50 лет, поскольку обнаружилась нестационарность климата Земли на довольно коротких временных интервалах в десятки лет. Параметры климата изменялись во времени, причем все более заметно. Доминирующая причина – антропогенное обогащение атмосферы парниковыми газами в ходе хозяйственной деятельности и, как следствие, усиление парникового эффекта.

Исследование этих тенденций эволюции земного климата потребовало серьезного развития ряда новых концепций и методов. Это коснулось в большей степени двух разделов климатологии – статистической климатологии и математического моделирования климатической системы.

Огромную роль в новом развитии статистической климатологии сыграл Георгий Вадимович Груза, доктор физико-математических наук, профессор (1931–2020 гг.). На протяжении своей долгой творческой жизни он работал во многих научных учреждениях Гидрометеорологической службы нашей страны. В 1990–2020 гг., работая в Институте глобального климата и экологии Росгидромета и РАН (сейчас он называется Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля – ИГКЭ), Г.В. Груза внес выдающийся вклад в создание, развитие и функционирование системы климатического мониторинга в России. Его научные работы этого направления посвящены созданию концептуальных основ и математических методов выявления изменчивости и изменений климата в условиях его нестационарности. В работе (Ранькова, Бардин, 2021) приведены обзор этих научных результатов и соответствующая библиография.

Одновременно с развитием статистической климатологии интенсивное развитие претерпело математическое моделирование климатической системы. Были созданы модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), а также их аналоги меньшей сложности. В России такие работы выполнены в Институте вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Институте физики атмосферы им. А.И. Обухова РАН и в Главной геофизической обсерватории им. А.М. Воейкова. Современная тенденция – дополнять подобные модели блоками, отвечающими за биогеохимические циклы, тем самым давая возможность учитывать их обратные связи с климатом. Таким образом, строятся еще более полные модели земной системы (Earth's system models).

Это новое развитие статистической климатологии и математического моделирования климатической системы позволило подойти с новых методологических позиций к решению следующих важнейших задач:

- характеристика наблюдаемых и ожидаемых долговременных аномалий метеовеличин и оценка их экстремальности;
- обнаружение изменений климата (trend detection);
- выявление их причин – атрибуция (attribution).

Очень существенно, чтобы решение этих задач сопровождалось оценкой неопределенности, поскольку это важно для оценки рисков при принятии решений, использующих результаты такого анализа.

Именно сочетание новых методов статистической климатологии и математического моделирования климатической системы позволяет сейчас во многих случаях успешно решать эти задачи.

Георгию Вадимовичу Груза исполнилось бы 90 лет в 2021 г. Отмечая эту дату, ИГКЭ организовал 10 ноября 2021 г. Научные чтения памяти Георгия Вадимовича Груза «Статистическая климатология: современные достижения

и новые идеи». Ведущими заседания были Э.Я. Ранькова и С.М. Семенов (ИГКЭ).

С приветствиями к участникам обратились:

- А.И. Бедрицкий, Почетный президент Всемирной Метеорологической Организации, Президент Российского гидрометеорологического общества;
- В.В. Соколов, заместитель руководителя Росгидромета;
- А.А. Романовская, директор ИГКЭ.

М.Ю. Бардин (ИГКЭ) представил обзорное сообщение «Концептуальный вклад Г.В. Груза в развитие современной климатологии», подготовленный совместно с Р.М. Вильфандом, Э.Я. Раньковой и А.М. Стериним.

Далее, были заслушаны следующие научные доклады (фамилия докладчика выделена подчеркиванием):

И.И. Мохов. Оценки роли естественных и антропогенных факторов в формировании современных климатических трендов и аномалий;

А.В. Кислов. Экстремальные осадки и ветер в Арктике: статистика, синоптические модели, моделирование;

Д.Б. Киктёв, Р.М. Вильфанд, В.Н. Крыжов, В.М. Хан. О вероятностных прогнозах различной заблаговременности в Гидрометцентре России;

А.М. Стерин, А.С. Лавров. Квантильная регрессия в климатологии;

М.Ю. Бардин, Т.В. Платова, О.Ф. Самохина. Климатическая изменчивость некоторых характеристик атмосферной циркуляции;

В.А. Семенов, М.А. Алешина, К.Д. Бабина, Н.Е. Куксова, Е.А. Черенкова. Некоторые особенности изменений экстремальности погодных аномалий на территории России в последние десятилетия;

О.Г. Золина, О.А. Дюфур (A. Dufour), С.К. Гулев. Статистика переноса влаги над Северной Евразией;

Г.В. Алексеев. Статистическая климатология Арктики;

Ю.П. Переведенцев, Б.Г. Шерстюков, К.М. Шанталинский. Региональные проявления современного потепления (на примере Поволжского региона);

Е.И. Хлебникова, И.М. Школьник, Ю.Л. Рудакова. Статистическая интерпретация климатических данных для обеспечения потребностей экономики РФ;

Е.П. Гордов. От статистической климатологии и климатического моделирования к цифровым двойникам климатических процессов.

Цель данной статьи – осветить современные результаты и новые продвижения, в которых играют существенную роль методы статистической климатологии в том виде, как они были представлены в докладах участников научных чтений.



Федеральная служба по
гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды (Росгидромет)



Российское
гидрометеорологическое
общество



СТАТИСТИЧЕСКАЯ КЛИМАТОЛОГИЯ: СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И НОВЫЕ ИДЕИ

Научные чтения, посвященные памяти Георгия Вадимовича Груза (1931-2020)



Москва, Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, 10.11.2021

Содержание научных докладов

Ниже приводятся расширенные резюме научных докладов, представленных на Научных чтениях, посвященных памяти Г.В. Груза.

Список литературных источников – общий; он приведен в конце статьи.

И.И. Мохов

Оценки роли естественных и антропогенных факторов в формировании современных климатических трендов и аномалий

Повышение глобальной приповерхностной температуры сопровождается быстрым ростом числа природных катастроф, в первую очередь вследствие гидрологических и метеорологических аномалий. В России с быстрым приповерхностным потеплением на 0.5°C за десятилетие количество опасных метеорологических явлений в летние сезоны растет почти в полтора раза при увеличении приповерхностной температуры на 1 К (Мохов, 2022). Климатические аномалии последних лет свидетельствуют не только об увеличении риска экстремальных региональных событий, но и о новых процессах и явлениях, характеризующих достижение определённого критического уровня климатических изменений. Согласно результатам анализа современных изменений климата с использованием модельных оценок с учётом естественных и антропогенных факторов в результате быстрого потепления в последние десятилетия земная климатическая система достигла режима,

сопоставимого с режимом оптимума голоцена (Мохов, Елисеев и др., 2020; Мохов, 2022).

Количественные оценки свидетельствуют о ключевой роли изменений радиационного воздействия парниковых газов в атмосфере в формировании трендов приповерхностной температуры (глобальной и разных широтных зон) на временных интервалах около полувека и более по сравнению с другими факторами, в том числе ведущими модами естественной климатической изменчивости. Отмечены значительные различия для широтных зон Южного и Северного полушарий, связанные с влиянием разных мод естественной климатической изменчивости при более слабых температурных трендах в Южном полушарии с большим покрытием океанами. Вследствие этого могут проявляться и проявляются отрицательные тренды приповерхностной температуры на интервалах в несколько десятилетий на общем фоне долгопериодного глобального потепления (Мохов, Смирнов, 2022).

С отмеченными особенностями температурных изменений связана одна из ключевых климатических проблем последних лет – разнонаправленные тренды протяженности антарктических и арктических морских льдов. Отмечавшееся до последних лет общее увеличение протяженности антарктических морских льдов связано с общим понижением температуры у поверхности в приантарктических широтах с конца 1970-х годов (с доступными спутниковыми данными) на фоне глобального потепления и быстрого уменьшения протяженности морских льдов в Арктике. Это результат регионального проявления естественных колебаний климата с периодами до нескольких десятилетий на фоне глобального векового потепления с относительно слабым температурным трендом над океаном в Южном полушарии. В последние годы отмечено резкое уменьшение площади морских льдов в Южном океане. Результаты корреляционного и кросс-вейвлетного анализа свидетельствуют о значимой когерентности и отрицательной корреляции в последние десятилетия между протяженностью морских льдов и приповерхностной температурой не только в Арктике, но и в Антарктике (Мохов, Парфенова, 2021).

При более сильных температурных трендах в Северном полушарии на основе спутниковых данных с начала XXI века отмечены положительные тренды региональной интенсивности бореальных пожаров. В общем количестве бореальных пожаров доминируют пожары Северной Евразии, в частности в российских регионах, при этом интенсивность пожаров в североамериканских лесах в среднем выше, чем в евразийских (Ситнов, Мохов, 2021). Выявлена тенденция увеличения плотности эмиссий продуктов горения в атмосферу, в том числе углекислого и угарного газов, а также мелкодисперсного аэрозоля. Отмечена значимая связь площадей природных пожаров и вызванных ими эмиссий в атмосферу продуктов горения с атмосферными блокировками над территорией России (Мохов, Бондур и др., 2020).

Формирование региональных погодно-климатических аномалий и их предсказуемость на фоне климатических трендов зависят от проявления ключевых

мод межгодовой и десятилетней изменчивости. Так, на фоне значимого роста частоты трансформации тропических циклонов во внетропические для северо-западной акватории Тихого океана с выходом циклонов в прибрежные внетропические регионы Евразии, включая Дальний Восток, проявляются существенные вариации для разных фаз Эль-Ниньо (Мохов, Макарова, 2020). Формированию рекордного амурского наводнения в 2013 г. и камчатского “красного прилива” в 2020 г. способствовали положительные аномалии температуры в северо-западной части Тихого океана, соответствующие отрицательной фазе Тихоокеанской десятилетней осцилляции. С режимами этого колебания связаны крупномасштабные климатические вариации типа “климатического сдвига” во второй половине 1970-х годов, отмечена связь с особенностями атмосферных блокирований. Рекордный по продолжительности период атмосферного блокирования над европейской территорией России летом 2010 г. с рекордной жарой и пожарами был отмечен в отрицательной фазе Тихоокеанской десятилетней осцилляции в год перехода из фазы Эль-Ниньо в фазу Ла-Нинья (Мохов, Макарова, 2021).

Проявляются различия аномальных режимов при явлениях Эль-Ниньо разного типа. Анализ атмосферных блокирований для последних десятилетий выявил региональные особенности их повторяемости при разных фазовых переходах явлений Эль-Ниньо в различных фазах Тихоокеанской десятилетней и Атлантической мультидесятилетней осцилляций (Мохов, Тимажев, 2022). В том числе отмечены особенности 2021 г., начавшегося в фазе Ла-Нинья с наиболее вероятным продлением этой фазы и на 2022 г. В этом случае, например, высока вероятность отсутствия экстремально холодных зимних месяцев 2022 г. в Прибайкалье и Забайкалье (Мохов, 2020; Mokhov, 2021). Следует отметить существенные различия тенденций изменения явлений Эль-Ниньо разного типа в последние десятилетия (Мохов, 2022).

А.В. Кислов

Экстремальные осадки и ветер в Арктике: статистика, синоптические модели, моделирование

Экстремальные явления представляют собой уникальные события. Это качество определяется тем, что к их возникновению приводит сочетание редких, как правило, независимых событий, произведение вероятностей которых и определяет маленькую вероятность итогового экстремального явления. Их статистическое описание может быть основано на двух подходах. Первый – это исследование статистических закономерностей в ранжированном ряду значений, превышающих заданную пороговую величину. В этом случае функция распределения вероятностей (ФРВ) выражена формулой Парето (Newman, 2006). Второй подход основан на исследовании статистики экстремумов, извлеченных из набора независимых «блоков», составляющих исходный ряд. При этом ФРВ описывается формулами Фреше, Вейбулла и Гумбеля (Extreme events, 2007), причем при подборе их в качестве моделей эмпирических ФРВ различия часто трудно уловимы. Теоретический анализ показывает,

что оба подхода обеспечивают, при выполнении ряда условий, статистически одинаковые результаты. Для аппроксимации можно использовать также гамма- и бета-распределения и смеси этих функций. В этом случае, однако, вид функции не устойчив и не универсален из-за того, что она определяется большим количеством эмпирически определяемых параметров. При изучении экстремумов в атмосферных и морских характеристиках указанные подходы широко применяются (Zolina et al., 2004; Katz, 1999; Maraun et al., 2010; Kislov, Matveeva, 2016; Kislov et al., 2021; Myslenkov et al., 2021).

Анализ статистики экстремальных значений показал, что ФРВ распадаются на базовое распределение (где присутствует подавляющее большинство значений) и на отклонения от этого базового распределения. В базовом распределении его самые большие представители названы Н. Талебом (2007) «Черные Лебеди» (ЧЛ), а отклоняющиеся от базового распределения аномалии – это так называемые «Драконы» (Д) или «Короли» (Sornette, 2009; Sornette, Ouillon, 2012). Здесь метафорически подчеркивается их необычность, выходящая за рамки «обычных» аномалий.

В настоящем исследовании анализу подвергнуты осадки (суточные суммы) и модуль скорости ветра, на основе данных измерений на станциях и по результатам моделирования. В последнем случае использованы данные реанализа (ERA INTERIM, ERA 5), численных экспериментов в рамках эксперимента «Historical» (осуществленного по протоколу CMIP5 моделью Земной системы ИВМ РАН), а также численных экспериментов, осуществленных с помощью модели COSMO-CLM (проведенных для воспроизведения 30-летнего ряда флуктуаций). Во всех случаях исходный ряд подвергался фильтрации, позволившей добиться от членов выборки статистической независимости.

Анализ экстремумов скорости ветра показал, что ФРВ распадается на две части (рис. 1). Четко выделяется область базового распределения (ЧЛ) и отличающиеся от них (Д), причем вероятности последних настолько регулярны, что можно определить для них собственную ФРВ. Для сверхбольших экстремумов осадков нет разумного соответствия между величинами аномалий и их вероятностью (рис. 1).

Важность этого результата в том, что можно предполагать, что различия в статистических свойствах указывают не только на различия функций распределения, но и на неодинаковость физики, присущей событиям одинаковой номенклатуры. Отметим также, что выделенное свойство экстремумов допускает развитие на этой основе объективной классификации событий.

В модельных данных также наблюдаются экстремальные события. Качество их воспроизведения, как оказалось, зависит от разрешения модели. Так, на основе реанализа ERA 5 показано, что приблизительно в половине случаев аномалия воспроизводилась в тот же день, что была отмечена по стационарным данным. Сама модельная аномалия несколько меньше, чем измеренное значение. Причем, в более чем в половине случаев совпадает и «тип» аномалии, т.е. принадлежность к ЧЛ или к Д. К аналогичным выводам можно прийти, анализируя данные высокодетальных расчетов, выполненных на

региональной модели COSMO-CLM (Platonov, Kislov, 2020). В то же время экстремумы, воссоздаваемые более грубыми атмосферными моделями, закономерно соответствуют базовому распределению, однако события «Д» не воспроизводятся. В этом убеждает анализ данных ERA INTERIM и данных атмосферного блока модели ИВМ РАН (Kislov, Matveeva, 2016).

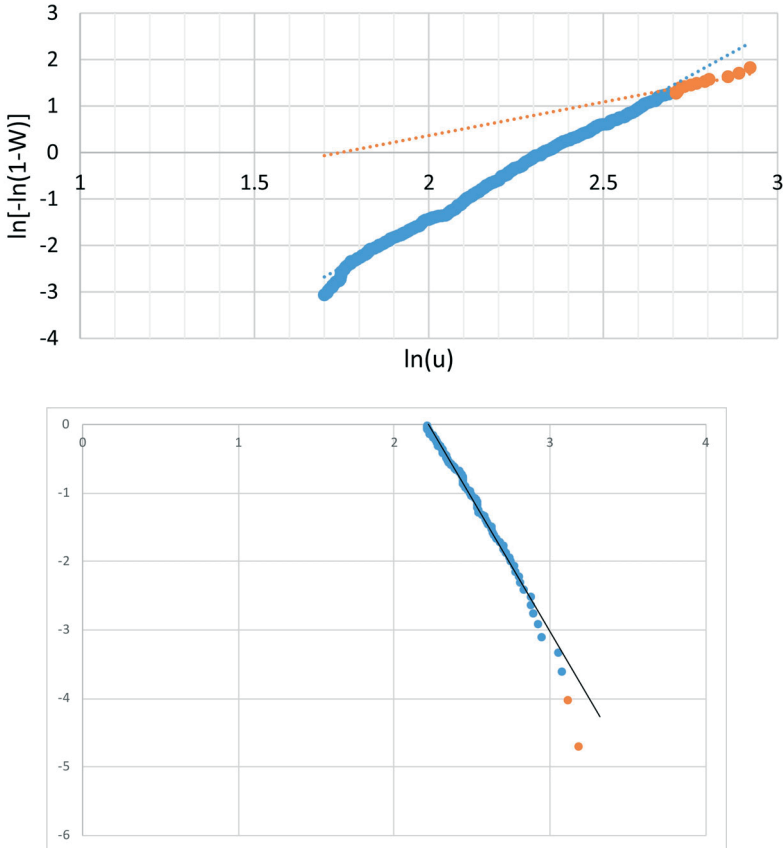


Рисунок 1. Интегральные функции распределения вероятности для модуля скорости ветра (а) и суточных сумм осадков (б), спрямленные на сетке распределения Вейбулла (а) и Парето (б), по измерениям в Териберке (Кольский п-в, побережье Баренцева моря)

Figure 1. Empirical cumulative distribution functions of wind speed modulus (a) and daily precipitation totals (b), straightening on the coordinate axis of the Weibull (a) and Pareto (b) distributions, based on measurements in Teriberka (Kola Peninsula, coast of the Barents Sea), and linear regression lines corresponding to the Weibull (a) and Pareto (b) functions.

С точки зрения синоптического анализа было продемонстрировано, что экстремумы, наблюдаемые в Арктике, связаны с циклонами и атмосферными фронтами (Kislov, Matveeva, 2020). Кроме этого, показано, что для экстремумов осадков необходимым условием является большое влагосодержание воздуха (Кислов и др., 2021).

В ряде случаев можно утверждать, что в формировании экстремумов участвуют мезомасштабные структуры, встроенные в системы синоптического масштаба (Kislov, Matveeva, 2021; Кислов и др., 2021). Такого рода циркуля-

ция может быть описана в стационарной форме следующим уравнением (Holton, Nakim, 2013):

$$\frac{U^2}{R} + fU = -g \frac{\partial H}{\partial n}, \quad (1)$$

где U – модуль скорости ветра, R – радиус кривизны траектории, f – параметр Кориолиса. Поскольку ФРВ геопотенциала (H) представляет собой, как показали результаты анализа данных, гауссову функцию, то такая же ФРВ при-суща и разности (Kislov, Matveeva, 2021). Это позволяет рассчитать ФРВ для модуля скорости ветра:

$$g(U) = \left(\frac{2U}{Rf} + 1 \right) \cdot \frac{1}{\sigma_g \sqrt{\pi(1-\rho)}} \cdot \exp\left[-\frac{(U^2/Rf + U)^2}{4\sigma_g^2(1-\rho)} \right], \quad (2)$$

Здесь ρ – коэффициент корреляции вариаций геопотенциала, σ_g – стандартное отклонение вариаций геострофического ветра.

Эта формула, выведенная из гидродинамических соображений (1), не эквивалентна формуле Вейбулла (упомянутой выше, как базовая основа описания ФРВ экстремумов скоростей ветра), однако структурно напоминает ее. В том числе следует упомянуть, что показатель степени у экспоненты близок к 4, что соответствует эмпирическим ФРВ (рис. 1) (Кислов, Матвеева, 2016, 2021).

В результате можно констатировать, что агеострофические течения с существенной кривизной траекторий непременно должны иметь распределение вероятностей экстремальных скоростей, близкое к распределению Вейбулла. В этом аспекте можно говорить, что осуществлено гидродинамическое обоснование появления определенной статистики аномалий у различных метеорологических показателей.

Это обстоятельство можно считать некоторым обоснованием того, почему экстремумы принципиально более надежно воспроизводятся мезомасштабными моделями, в которых, в отличие от грубых моделей, автоматически допускаются сложные траектории движения воздуха (ассоциируемые с явлениями мезометеорологического масштаба, такими, как линии шквалов, мезоциркуляционные комплексы). Разумеется, из общих соображений можно считать, что вклад в экстремумы определяют и более правильно воспроизводимые в таких моделях притоки тепла и водяного пара, а также микрофизические процессы осадкообразования.

Д.Б. Киктев, Р.М. Вильфанд, В.Н. Крыжов, В.М. Хан

О вероятностных прогнозах различной заблаговременности в Гидрометцентре России

Анализ статистической структуры полей метеорологических элементов, выполненный группой исследователей под руководством Г.В. Груза, продемонстрировал, что значительная доля дисперсии осреднённых по времени значений этих элементов является непредсказуемой (Груза и др., 1979). Так,

для большинства метеорологических параметров, осреднённых за месяц, максимально предсказуемая доля дисперсии составляет 30-50% (при этом эту детерминированную долю изменчивости нужно ещё научиться прогнозировать). В этой связи вероятностная форма представления является естественной для метеорологических прогнозов. Это относится к метеорологическим прогнозам любой заблаговременности. Пионерские работы по вероятностному метеорологическому прогнозированию в нашей стране (Груза, Ранькова, 1983) также связаны с именем Г.В. Груза.

В соответствии с Техническим регламентом ВМО (ВМО, 2019) сегодня выпуск глобальных вероятностных ансамблевых средне- и долгосрочных метеорологических прогнозов входит в число обязательных задач Гидрометцентра России как Мирового метеорологического центра ВМО. Основные проблемы при построении прогностических ансамблей:

- правильное моделирование неопределенности начальных условий, включая определение начальных состояний океана, суши и морского льда;
- правильное моделирование неопределенности из-за несовершенства прогностической модели.

В настоящее время проходит оперативные испытания новая система ансамблевого среднесрочного прогноза погоды Гидрометцентра России с построением ансамбля начальных данных на базе локального ансамблевого фильтра Калмана с преобразованием ансамбля. Задача построения прогностических ансамблей при этом тесно смыкается с задачами усвоения данных наблюдений. Для учета несовершенства модели используются возмущения ее физических параметризаций и прогностических тенденций.

Для генерации ансамбля начальных состояний в задачах долгосрочного прогноза на базе модели ПЛАВ в Гидрометцентре России используется методика выращивания быстроразвивающихся возмущений BGM (Breeding of Growing Modes). Для температуры поверхности океана и ледового покрова при интегрировании модели по времени применяется инерция начального состояния с релаксацией к климату.

Надежды на долгосрочный метеорологический прогноз в значительной степени связаны с влиянием внешних воздействий на атмосферу, которые изменяются медленнее, чем текущая погода, но которые могут оказывать заметное влияние на статистические характеристики атмосферной циркуляции. Можно предположить, что влияние медленных внешних воздействий должно проявляться и в статистике экстремальных явлений внутри периода долгосрочного прогноза. На внутрисезонных масштабах также еще сохраняются элементы памяти начального состояния системы атмосфера-океан-суша-лед. В Гидрометцентре России проводятся эксперименты по прогнозированию характеристик внутрисезонной изменчивости.

По данным ансамбля сезонных прогностических реализаций с ежесуточным или более высоким разрешением можно получить ансамбль производных выборочных статистик и на его основе статистическое распределение этих выборочных статистик внутри сезона и оценить, насколько оно необычно в сравнении с соответствующим климатическим распределением. Обь-

ектами прогноза при этом могут выступать различного рода экстремумы на фоне внутрисезонной изменчивости (например, количество превышений определенного порогового уровня в значениях метеорологического параметра; продолжительность периодов такого превышения; количество тропических циклонов; сроки начала муссона; дата первых заморозков и другие статистики от рядов ежесуточных прогностических данных).

Для задач краткосрочного численного прогноза по ограниченной территории в Гидрометцентре России предложена новая схема генерации прогностических ансамблей на основе возмущения модельных прогностических тенденций АМРТ (Additive Model perturbations scaled by Physical Tendency).

Для детализированного прогнозирования (пространственная детализация – 1 км, временное разрешение – 10 мин, частота обновления прогнозов – 10 мин) интенсивности осадков на срок до 2-3 часов в Гидрометцентре России функционирует технология вероятностного радарного наукастинга интенсивности осадков на базе мультипликативной каскадной модели. Источниками неопределенности такого прогноза являются ошибки определения начального состояния (поля осадков и поля скоростей) и ограничения лагранжевой инерции как модели прогноза эволюции осадков и адвекции (ошибки модели). Основной вклад в ошибки модели связан с эволюцией поля осадков, проявляющейся в их инициации, усилении, ослаблении или прекращении. Неопределенность прогнозов оценивается на основе стохастического моделирования с генерацией ансамбля полей скоррелированного шума, добавляемых к детерминированному наукасту, построенному в предположении лагранжевой инерции радарных осадков.

Информация о неопределенности прогноза помогает правильному восприятию прогностической информации потребителями, что существенно для принятия решений. Прогноз не может быть полным без оценки степени его неопределенности. Тем не менее, в ожиданиях потребителей, в механизмах принятия решений, в нормативной базе сильна детерминистская «инерция». Внедрение вероятностного подхода в «обыденное сознание» и прогнозистов, и потребителей – очень постепенный процесс.

Повышение качества и расширение сферы использования вероятностных метеорологических прогнозов требует улучшения всех звеньев цепочки подготовки этой продукции – усвоения данных наблюдений с оценкой степени неопределенности начального состояния атмосферы, использования эффективных способов генерации прогностических ансамблей, технологий интерпретации, сжатия и эффективного представления вероятностной информации («последняя миля» в этой цепочке очень важна).

А.М. Стерин, А.С. Лавров

Квантильная регрессия в климатологии

В условиях меняющегося климата необходимо иметь наиболее полную информацию о статистических характеристиках распределения метеорологических величин. К числу важнейших для климатологии статистических

характеристик относятся долгопериодные тенденции изменения средних значений, экстремальные и близкие к экстремальным значения, а также тенденции их изменения.

Традиционный аппарат для оценки климатических трендов – Метод Наименьших Квадратов (МНК), применяемый для анализа линейной регрессии. Однако его применение корректно, только если выполняются условия гомоскедастичности (постоянства ошибки на всем интервале изменений предикторов) и некоррелированности рядов, что, например, для задачи оценки климатических трендов зачастую далеко не так. МНК дает картину изменения только средних значений, но при этом не дает никакой информации об изменениях «хвостов» распределений (значений предиктанта, близких к экстремальным). При этом оценки МНК очень чувствительны к выбросам.

Квантильная регрессия (Koenker, Bassett, 1978) – робастный непараметрический инструментальный регрессионного анализа – дает оценки значений коэффициента регрессии для произвольного значения квантиля предиктанта: τ , $0 < \tau < 1$.

Решение задачи построения линейной квантильной регрессии для произвольного значения квантиля ведется путем оптимизации следующего выражения:

$$\hat{\beta} = \mathit{armin} \left[\sum_{i \in \{i: y_i \geq x_i' \beta\}} \tau |y_i - x_i' \beta| + \sum_{i \in \{i: y_i < x_i' \beta\}} (1 - \tau) |y_i - x_i' \beta| \right]$$

Здесь $\{x_i\}$ и $\{y_i\}$ – совокупности соответствующих значений предиктора x и предиктанта y , занумерованных натуральным индексом i , а armin означает то значение параметра β , при котором выражение, приведенное в квадратных скобках, достигает минимума.

Можно выделить три направления использования квантильной регрессии в климатологии:

- анализ климатических трендов во всем диапазоне изменения квантилей значений метеовеличины (график зависимости коэффициента регрессии, в данном случае – тренда, от значения квантиля τ носит название процесс-диаграммы). В частности, во ВНИИГМИ-МЦД, с участием авторов, на основе метода квантильной регрессии был выполнен анализ трендов в широком диапазоне изменения квантилей значений как приземной температуры, так и температуры в свободной атмосфере;

- иные, чем анализ климатических трендов, задачи регрессии в климатологии (оценки связи между характеристиками климата, задачи даунскейлинга и др.);

- обновление используемых в прикладной климатологии (для нужд строительства, транспорта, энергетики и др.) характеристик, основанных на квантилях, обоснование необходимости таких обновлений.

В нашем исследовании оценка трендов приземной суточной температуры методом квантильной регрессии осуществлялась на основе данных метеоро-

логических станций, имеющих не менее 30 лет наблюдений за период 1987-2020 гг. Таких станций на территории России более 1400.

Для процесс-диаграмм расчеты осуществлялись для следующих значений квантилей: 0.01; интервала значений от 0.05 до 0.95 с шагом 0.05; 0.99. Оптимизационная задача при вычислении коэффициента квантильной регрессии решалась симплекс-методом. Стандартные ошибки оценивались методом бутстрепа с 200 повторениями и доверительной вероятностью 0.95.

Перечисленные выше оценки квантильных трендов для различных τ рассчитывались для каждого из четырех сезонов для аномалий суточных температур: t_{min} (суточный минимум), t_{max} (суточный максимум) и t_{mean} (средняя суточная). Далее, на основе рассчитанных коэффициентов квантильных трендов по каждой станции рассчитывались характеристики:

- разность между коэффициентами тренда β для разных значений квантилей: между квантилями $\tau = 0.25$ и 0.05 (характеристика «левого хвоста распределения»); квантилями $\tau = 0.75$ и 0.25 (характеристика «срединной части распределения»); квантилями $\tau = 0.95$ и 0.75 (характеристика «правого хвоста распределения»);
- среднее значение тренда по всем рассчитанным квантилям.

Всего рассчитывались 48 характеристик, каждая из них проходила процедуру стандартизации – приведение к нулевому среднему и единичной стандартной ошибке.

Для кластеризации станций в пространстве 48-ми переменных (характеристик квантильных трендов) использовалась стандартная процедура, реализующая метод k-средних (k-MEANS). Кластеризация осуществлялась по 1414 станциям, имеющим не менее 30 лет наблюдений по всем сезонам.

Были определены «начальные зародыши» (seeds) кластеров, при этом география распределения станций частично учитывалась только при выборе «начальных зародышей» кластеров, а в процессе кластеризации переменные, учитывающие географию, не были использованы.

На рис. 2 представлены: результат выбора станций-«зародышей» кластеров (левая панель) и результаты кластеризации – 12 кластеров станций на территории России, схожих по проявлению трендов приземной температуры (правая панель).

Более детальный анализ региональных особенностей проявления квантильных трендов приземной температуры на территории России, результаты которого будут опубликованы отдельно, позволяет отметить следующее:

- сходство характера изменения температуры в азиатской и европейской Арктике – схожи кластеры 1 и 4; для разных широт Европейской части России – кластеры 4, 8, 9, 6; и для средних широт Западной Сибири, Средней Сибири и Восточной Сибири – кластеры 3,12;
- особое проявление потепления в азиатской части российской Арктики, причем наиболее явно выраженное для осенних месяцев и неравномерное в диапазоне изменений квантиля, а именно: более быстрое потепление для малых значений квантилей.

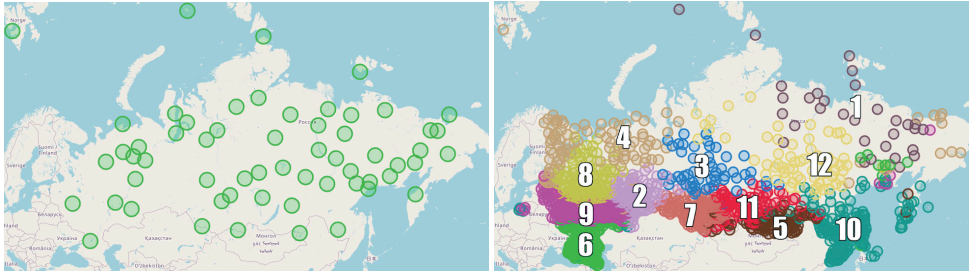


Рисунок 2. Левая панель: исходно выделенные 60 станций на территории России, чьи оценки квантильных трендов аномалий температуры взяты в качестве «зародышей» для кластеризации. Правая панель: результаты кластеризации методом k-средних; различными цветами выделены 12 кластеров

Figure 2. Left panel: initially selected 60 stations on the territory of Russia, whose estimates of quantile trends of temperature anomalies are taken as "seeds" for clustering. Right panel: k-means clustering results; 12 clusters are highlighted in different colors

М.Ю. Бардин, Т.В. Платова, О.Ф. Самохина

Волны жары в европейской России и атмосферная циркуляция

Летние волны жары – одно из важных погодно-климатических явлений, оказывающих негативное воздействие на разные стороны жизни и деятельности человека.

В этом сообщении рассматриваются крупные волны жары, охватывающие одновременно значительную территорию. Они определялись, как достаточно длительные эпизоды, когда средняя величина некоторого индекса температурного режима крупного региона превышала заданный процентильный порог. В данном случае в качестве индекса рассматривалась аномалия средней суточной стационарной температуры, процентильный порог 90%, а пороговая длительность эпизода – 5 дней; регион – Европейская часть России (ЕЧР) севернее 50°с.ш.

На рис. 3 показан ряд суммарной сезонной продолжительности (ТД) таких волн. Они наблюдаются не каждый год; более того, имеются непрерывные периоды без крупных волн жары: самый длинный – более десятилетия, с 1961 по 1971 год. Сглаженная кривая указывает, что с середины 1980-х гг. наблюдается рост ТД, а с 2005 года они наблюдаются ежегодно. Выделяются 3 года, когда ТД превысила 35 дней: 1972, 2010 и 2016 гг. Понятно, что если даже не учитывать непрерывность эпизодов, то просто осуществление более 30 событий со средней частотой 0.1 в выборке из 90 элементов – чрезвычайно маловероятное событие. Связность обусловлена сохранением физических условий. Регионально – это долгоживущие режимы атмосферной циркуляции, которые следует выявить (ясно, что они, в свою очередь, определяются специфическими географическими структурами температуры подстилающей поверхности, в первую очередь – океана).

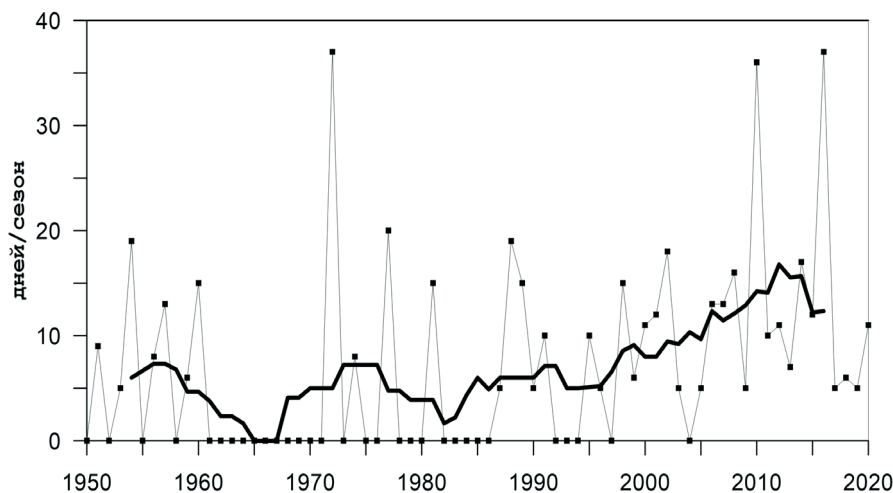


Рисунок 3. Суммарная летняя продолжительность волн жары в ЕЧР в области 50-70°с.ш. и 27-60°в.д. (число суток за сезон)

Figure 3. The total summer duration of heat waves in the ER in the area of 50-70° latitude. and 27-60°v.d. (number of days per season)

На роль таких режимов циркуляции, в первую очередь, претендуют эпизоды блокирования западного переноса (Обухов и др., 1984; Бардин, 2007). Ранее было показано (Бардин и др., 2019; Черенкова и др., 2020), что антициклоническая активность и суммарная продолжительность эпизодов блокирования летом в ЕЧР резко возрастают в отрицательной фазе циркуляционной моды ВАЗР (Восточная Атлантика – Западная Россия, или Eurasia-2 (Barnston, Livezey 1987). Несколько менее значительный рост блокирующей активности в северной половине ЕЧР обнаружен также для положительной фазы моды СКАНД (для нее также напрямую показан рост частоты экстремумов температуры: (Бардин, Платова 2019).

Однако, это было обнаружено для циркуляционных структур, ранее найденных, исходя из соображений, не связанных с частотой температурных экстремумов. Возникает вопрос: насколько ими исчерпываются крупномасштабные циркуляционные условия, сопутствующие крупным волнам жары в рассматриваемом регионе? Для выяснения этого были проанализированы ведущие эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) поля геопотенциала H500 за даты всех крупных волн жары в северной половине ЕЧР. Первые пять ЭОФ объясняют более 40% суммарной дисперсии выборки; на первые 2 приходится 26%. Были получены оценки того, как часто волны жары сопровождалась сильной фазой одной из полученных ведущих ЭОФ H500 (под сильной фазой понималась дата, когда соответствующая главная компонента ГК – проекция поля H500 на ЭОФ – входила в 15% максимальных или минимальных). Рассматривались наиболее длительные (от 10 дней) волны, которых всего оказалось 13. Для каждой из них рассчитывались величины $\Sigma 1$ -p% – доля дней в волне, когда наблюдалась сильная фаза хотя бы

одной из ЭОФ 1, p ($p = 2, 5$). Для $p = 5$ оказалось, что в среднем по рассмотренным сверхдлительным волнам $\Sigma 1-5 = 90\%$, причем для 8 волн $\Sigma 1-5 = 100\%$ (т.е. волна полностью сопровождалась сильной фазой одной из 5 ведущих ЭОФ), и все $\Sigma 1-5 > 70\%$. Первые 2 ЭОФ сопровождают в среднем 56% дат таких волн; наибольшие значения $\Sigma 1-2$ наблюдались для отмеченных выше трех лет: в 1972 году было 2 волны (в июле и августе), с $\Sigma 1-2 = 88$ и 73%; в 2010 – три волны (в первой и второй половине июля и в первой половине августа), для июльских волн $\Sigma 1-2 = 100\%$, а для августовской только 36% (но $\Sigma 1-5 = 86\%$, т.е. циркуляционные условия отличались), и в единственной, но сверхдлительной (25 дней в августе) волне $\Sigma 1-2 = 88\%$.

На рис. 4 показаны композиты полей H500 и H1000 в сильной отрицательной (m) и положительной (p) фазах ЭОФ-1. Типичная структура ВАЗР⁻ присутствует и в композитах ЭОФ-3,4,5, которые различаются в основном расположением очагов положительной и отрицательной аномалии давления в азиатской части России. Отрицательная фаза ВАЗР (в среднем -1.1) наблюдается для месяцев всех длительных волн, кроме августовской 1972 и июльской 2008 г. Таким образом, ЭОФ-1-5 можно рассматривать, как «подтипы» ВАЗР⁻. Исключение составляет ЭОФ-4, положительная фаза которой (рис. 4ж) практически повторяет положительную фазу Скандинавской моды: диполь между Скандинавией (+) и Средиземноморьем (-) и отрицательная аномалия над севером Западной и Средней Сибири. Отметим, что структура приземного барического поля и в этом случае аналогична таковой для обеих фаз ЭОФ-1.

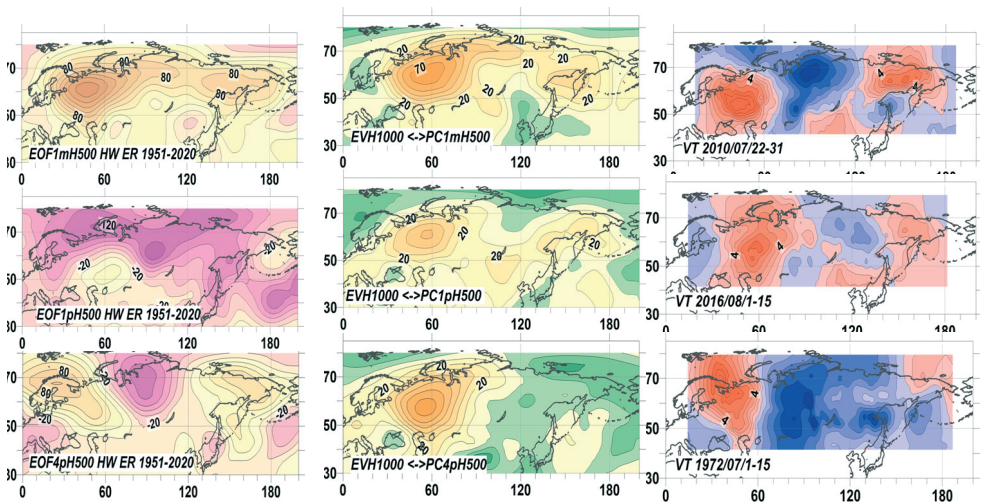


Рисунок 4. Композиты полей H500 (а) и H1000 (б) за даты 15% наибольших значений ГК1 (а, б); то же для 15% наименьших значений (г, д); то же для 15% наибольших значений ГК4 (ж, з).

Средние аномалии температуры для волн жары 22-31 июля 2010 года (в),
 1-15 августа 2016 года (е); 1-15 июля 1972 года (и)

Figure 4. Composites of fields H500 (a) and H1000 (b) for the dates of 15% of the highest values of HA1 (a, b); the same for 15% of the smallest values (d, e); the same for 15% of the highest GK4 values (w, h). Average temperature anomalies for heat waves on July 22-31, 2010 (c), August 1-15, 2016 (f); July 1-15, 1972(s)

Связанные с ЭОФ-1m,p и ЭОФ-4p сверхдлительные волны жары демонстрируют структуры аномалий температуры, согласованные со структурами циркуляции. Максимум аномалии тепла над ЕЧР в июле 2010 и августе 2016 расположен между 50-60°с.ш. В 2010 он расположен между 40-50°в.д., а в 2016 – на 10° восточнее. Ассоциирующаяся в значительной степени с модой СКАНД (9 из 15 дней) июльская волна 1972 года локализована на северо-западе ЕЧР.

Рост сезонной продолжительности волн жары после 1970-х естественно связать с общим современным потеплением. Однако, как показано в (Бардин, Платова 2019, 2020), сезонная повторяемость температурных экстремумов тесно связана с фазами мод атмосферной циркуляции. Связанная с большинством крупных волн жары в ЕЧР мода ВАЗР демонстрирует постоянный отрицательный сдвиг с начала 1970-х (рис. 5а), переходя в область отрицательных значений около 2000 года, что способствует указанному росту.

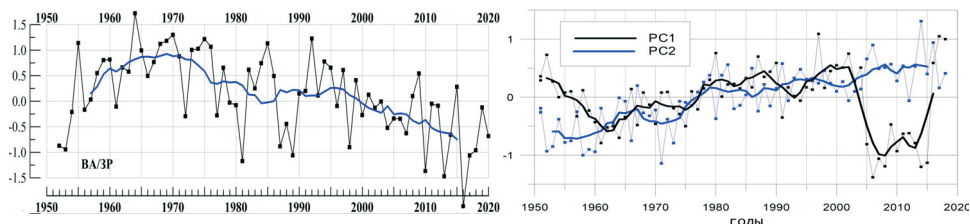


Рисунок 5. Индекс ВАЗР (синяя линия – 11-летнее скользящее среднее) (а); H500: ГК1 и ГК2 (б)

Figure 5. VAZR index (blue line – 11-year moving average) (a); GK1 and GK2 of H500 (b)

Представляют интерес подробности этих изменений для основных «подтипов» ВАЗР. На рис. 5б показаны изменения ГК1 и ГК2. ГК2 растет почти монотонно весь период с 1950 г., а ГК1 растет после 1960-х, достигая после 1990 года значений среди 15% максимальных, а в 2005 году происходит переброс к значениям около 1, в течение десятилетия оставаясь среди 15% наименьших. В это десятилетие при больших по модулю отрицательных ГК1 и положительных ГК2 наблюдается 5 из всех 13 волн длительностью от 10 дней. Затем в 2015 году происходит обратный переброс и волны сопровождаются одновременно высокими положительными ГК1 и ГК2. Таким образом, монотонное убывание ВАЗР после 2000 г. включает в себя перебросы ГК1 между высокими по модулю положительными и отрицательными значениями, которые соответствуют двум различным подтипам ВАЗР⁺. В среднем за период 1951-2020 гг. сезонная продолжительность волн жары составила 7 суток; для десятилетия 2005-2014 – 12.2 суток, и для 2015-2020 – 12.6 суток. Ранее было отмечено (Черенкова и др., 2020), что отрицательная фаза ВАЗР ассоциируется с повышенными температурами Северной Атлантики. Таким образом, при потеплении можно ожидать дополнительного по отношению к смещению средних температур роста сезонной продолжительности волн жары за счет изменения условий атмосферной циркуляции.

Исследование поддержано Росгидрометом (тема 3.2 НИТР), РНФ (проект 19-17-00242), ГЗ (№ 0148-2019-0009, АААА-А19-119022190173-2).

В.А. Семенов, М.А. Алешина, К.Д. Бабина, Н.Е. Куксова, Е.А. Черенкова
Некоторые особенности изменений экстремальности погодных аномалий
на территории России в последние десятилетия

Изменения климата на территории России сопровождаются изменением частоты и интенсивности опасных погодных явлений. По данным Росгидромета, с конца 1990-х гг. до середины 2010-х гг. число зарегистрированных опасных погодных явлений (ОПЯ) на территории России монотонно росло и увеличилось примерно с 200 случаев в год до более чем 500 случаев, т.е. как минимум в два с половиной раза. Во второй половине 2010-х гг. отмечается некоторое снижение числа ОПЯ (Черногаева и др., 2021). Вопрос о том, с чем связан такой быстрый рост ОПЯ в первые 15 лет XXI века и почему в последние 6 лет этот рост прекратился, остается открытым. На число ОПЯ могут влиять как объективные факторы увеличения экстремальности погодных аномалий при изменении климата, так и факторы, связанные с плотностью сети наблюдений, изменением методик измерений, перераспределением ОПЯ по классам и др. Также открытым остается вопрос о механизмах влияния глобального потепления на экстремальность климата (Мохов, Семенов, 2016).

Обзор наблюдаемых изменений экстремальных положительных температурных аномалий с 1950-х гг. показывает существенный рост практически во всех регионах суши. Этот рост можно с высокой уверенностью связать с антропогенным воздействием на климат, прежде всего путем эмиссий парниковых газов, т.е. наблюдаемые изменения воспроизводятся в моделях климата при заданном антропогенном воздействии (IPCC, 2021). Такие тенденции в целом ожидаемы при росте средней температуры. Изменения сильных осадков в сторону более экстремальных за тот же период не так ярко выражены и указывают на значимый рост, главным образом, на территории Евразии, внетропической части Северной Америки и Южной Африки. При этом уровень достоверности связи роста сильных осадков с антропогенным воздействием также ниже, чем для температурных экстремумов. Рост температуры океана должен приводить к увеличению испарения с поверхности океана и осадков, т.е. к интенсификации гидрологического цикла. Однако изменения осадков связаны с переносом влаги крупномасштабной циркуляцией и вихрями, региональным испарением, устойчивостью атмосферы, конвективными процессами и, таким образом, имеют неоднородную структуру и сложно зависят от глобальной и региональной температуры.

Отмеченный при анализе данных наблюдений рост экстремальности аномалий температуры и (в меньшей степени) сильных осадков согласуется с изменениями физических процессов при глобальном потеплении, которые, в большинстве своем, указывают на увеличение экстремальности при росте температуры. Вместе с тем существует и ряд факторов, приводящих к снижению экстремальности, а также региональные особенности изменения экстре-

мальности погоды и климата, качественно отличающиеся от общих тенденций. Кратко перечислим некоторые факторы, приводящие к изменению экстремальности аномалий температуры и осадков.

Рост средней температуры (ввиду нормального распределения температурных аномалий) приводит к нелинейному росту частоты превышения пороговых температур (при сохранении более высоких моментов распределения, изменения которых, как правило, значительно меньше, чем для средних значений). Рост температуры сопровождается экспоненциальным ростом влагоемкости атмосферы, что при условии достаточного притока влаги должно приводить и к росту интенсивности осадков. Поскольку суша теплеет при глобальном потеплении быстрее, чем океан (Dommenget, 2009), в теплое время года, когда океан, как правило, холоднее суши, происходит рост температурного контраста океан-суша с усилением бризовой и муссонной циркуляции, контрастности воздушных масс и, соответственно, экстремальности погоды в прибрежных регионах.

Уменьшение температурного контраста между Арктикой и средними широтами Северного полушария (СП) из-за так называемого арктического усиления (Bekryaev et al., 2010) приводит к замедлению среднеширотного западного переноса и струйного течения. В результате может увеличиваться частота формирования блокирующих антициклонов, приводящих к аномально жаркой погоде летом и аномальным морозам зимой, а также расти количество меридиональных вторжений с юга и севера, приносящих аномально теплые/холодные воздушные массы в средние широты СП, что также сопровождается ростом числа аномальных погодных режимов (Мохов, Семенов, 2016).

Рост влагоемкости атмосферы и ее абсолютной влажности означает увеличение скрытой энергии в атмосфере, которая при конденсации водяного пара может приводить к сильному нагреву и переходу в энергию конвективных движений, связанных с экстремальными осадками, шквалами, смерчами. Также с увеличением температуры в целом во внетропических широтах отмечается рост вертикального температурного градиента, что означает снижение статической устойчивости атмосферы и может способствовать увеличению риска опасных явлений, связанных с развитием конвекции (Мохов, Акперов, 2006).

Отмеченное выше уменьшение меридионального температурного градиента в высоких и средних широтах СП означает снижение интенсивности адвективных аномалий температуры, что должно приводить к снижению изменчивости температуры, как правило, связанной именно с адвективным переносом и, соответственно, к снижению экстремальности погоды. Экспоненциальный рост влагоемкости атмосферы с увеличением температуры при меньшем росте притока влаги из-за испарения и переноса сопровождается снижением относительной влажности во многих регионах, что приводит к увеличению статической устойчивости и снижению частоты осадков. Более быстрое потепление над сушей зимой, когда океан теплее суши, приводит к снижению температурного контраста океан-суша и, соответственно, к умень-

шению контрастности воздушных масс и потенциально – экстремальности определенного класса погодных аномалий.

В то время как большое число исследований указывает на рост экстремальности погоды в последние десятилетия при увеличении глобальной температуры, стоит упомянуть результаты, указывающие на возможность снижения экстремальности температуры и осадков, иллюстрирующие приведенные выше физические механизмы.

Исследование изменчивости среднесуточных температурных аномалий, по данным стационарных наблюдений на территории России, показало преобладающее снижение среднеквадратичного отклонения аномалий температуры во всех внутремесячных диапазонах изменчивости – межсуточном (до 3 суток), синоптическом (3-10 суток) и диапазоне устойчивых погодных режимов (11-30 суток) – в XXI веке по сравнению с последними тремя десятилетиями XX века (Бабина, Семенов, 2019). Это объясняется уменьшением меридиональных температурных контрастов при глобальном потеплении.

Ранее во многих регионах планеты была установлена нелинейная связь величины экстремальных осадков с приземной температурой. Анализ данных для территории России показал, что если в холодное время года интенсивность суточных экстремальных осадков экспоненциально растет с температурой, то летом в южных регионах страны рост происходит до некоторого порога (15-20°C), после чего интенсивность экстремальных осадков с ростом температуры снижается (Aleshina et al., 2021). Предполагается, что это связано со снижением относительной влажности из-за недостатка притока влаги.

Таким образом, можно отметить, что региональные изменения экстремальности погодных аномалий при глобальном потеплении помимо роста средней температуры обусловлены изменением динамики атмосферы (в том числе вихревой активности), температурных контрастов и процессов конвективной неустойчивости. При общем росте температуры региональные тенденции изменения экстремальности могут быть как положительными, так и отрицательными, а также иметь немонотонную зависимость от температуры.

Г.В. Алексеев

Статистическая климатология Арктики

В 1979 г. в работе Г.В. Груза и Э.Я. Раньковой «Данные о структуре изменчивости климата. Температура воздуха на уровне моря» впервые были представлены средние значения температуры и модуля ее горизонтального градиента в зоне 85-30°с.ш. за январь, июль и год 1891-1976 гг. Оказалось, что температура и модуль ее горизонтального градиента находятся в обратной зависимости, которая максимальна, наиболее выражена в январе. Это указало на связь между интенсивностью воздухообмена и температурой воздуха, что послужило основанием для индексов циркуляции, предложенных в работах (Алексеев, 2014; 2015).

В другой работе Г.В. Груза и Э.Я. Раньковой «Структура и изменчивость наблюдаемого климата. Температура воздуха Северного полушария», в

1980 г., отмечен феномен роста среднеквадратического отклонения среднемесячной приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) в направлении полюса и обнаружен максимум в зоне 60-70°с.ш. в холодную половину года. Это было одной из первых оценок полярного усиления (ПУ), причины которого до сих пор до конца не выяснены.

Наши исследования указывают на усиление циркуляции и междуширотного воздухообмена как основную причину ПУ, на которую накладывается эффект сокращения площади морских льдов. Статистический анализ обеих составляющих в повышении ПТВ над областью распространения морских льдов (морская Арктика) с использованием индекса меридиональной циркуляции и изменений площади морских льдов и температуры воздуха от месяца к месяцу в Северном Ледовитом океане позволил количественно оценить вклад сокращения площади льда (табл. 1). Расчёт включает оценку регрессий (параметров чувствительности (Мохов, 1984)) изменений от месяца к месяцу площади и протяженности морского льда на соответствующие изменения температуры воздуха, которые умножались на тренды изменений площади льда. Алгоритм расчёта представлен в (Алексеев, 2014; 2015).

Из таблицы следует, что вклад сокращения площади льда повышает температуру воздуха (тренд) с августа по март (апрель) и понижает в мае-июле, когда лед тает и прогревается верхний слой воды. Притоку водяного пара принадлежит особенно важный вклад в потепление морской Арктики через увеличение нисходящей длинноволновой радиации (НДВР), замедляющей нарастание льда и ускоряющей летнее таяние. При этом источники тепла находятся в низких широтах, где приток солнечной радиации превышает уходящее излучение на верхней границе атмосферы.

Таблица 1. Вклад (%) сокращения площади морского льда в повышение температуры воздуха в морской Арктике

Table 1. Contribution (%) of sea ice reduction to air temperature incrising over the maritime Arctic

Годы	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1979-2020	74	64	73	30	-52	-7	-50	66	92	83	15	47
1989-2020	35	51	77	-0.1	-8	-2	-19	48	64	39	21	31

Однако, приток в Арктику поступает из прилегающих океанических областей, прежде всего, из Северной Атлантики и Североевропейского бассейна, куда тепло все в большем количестве доставляется из тропической области взаимодействующими океанической и атмосферной циркуляциями (Алексеев, Кузмина, 2017; Alekseev, Kuzmina et al., 2019; Алексеев, Вязилова и др., 2019; Alekseev, Glok et al., 2021)

Интенсивность циркуляции растет вслед за повышением температуры поверхности океана (ТПО) в низких широтах, где происходит рост потока солнечной радиации на верхней границе атмосферы (Borisenkov et al., 1983; Федоров, 2018). Изменения инсоляции малы, но их эффект усиливается накоплением тепла в океане, составляющем большую часть площади низких

широт, малым альбедо поверхности океана и нелинейными обратными связями между температурой, содержанием водяного пара и нисходящим потоком длинноволновой радиации. В результате слабый рост инсоляции сопровождается заметным повышением ТПО, температуры воздуха и содержания водяного пара (Alekseev, Glok et al., 2020; Alekseev, 2021), а усилившаяся циркуляция атмосферы и океана способствует переносу более теплого и влажного воздуха и нагретой воды в высокие широты.

Глобальные модели климата недооценивают положительные тенденции потепления океана в низких широтах. Основная причина расхождений – отсутствие в глобальных моделях положительного тренда инсоляции на верхней границе атмосферы в низких широтах весной. В результате в модельных расчётах не обнаруживается наибольшего роста ТПО в тропиках осенью, подобного наблюдаемому росту. В то же время учёт роста инсоляции низких широт как фактора глобального потепления, не зависящего от роста/сокращения выбросов CO₂, позволит уточнить прогнозы изменений климата и морского ледяного покрова в Арктике.

О.Г. Золина, А. Дюфур, С.К. Гулев

Статистика переноса влаги над Европейским континентом

Интенсивность и направление переноса влаги в атмосфере во многом определяют локализацию и интенсивность экстремальных осадков, так как количество влаги, конденсирующейся и выпадающей при сильных и экстремальных осадках, не может быть обеспечено локальными процессами испарения. Таким образом, основным источником влаги для экстремальных осадков в средних широтах Северного полушария является транспорт влаги, который осуществляется, в основном, среднеширотными циклонами. В связи с этим статистический анализ характеристик переноса влаги очень важен не только для понимания общих закономерностей распределения атмосферной влаги, но и для понимания механизмов образования и выпадения сильных и экстремальных осадков.

В докладе были представлены некоторые результаты анализа переноса влаги над Европой по данным 4-х реанализов и станций высотного зондирования IGRA. Анализировался перенос влаги из Атлантического океана через условную береговую границу Европы на континент. Для оценки переноса влаги рассчитывалась локальная дивергенция влаги вдоль западной границы Европейского континента. Расчет производился на модельных уровнях с учетом спектрального представления рельефа на сигма уровнях. Также на каждом шаге интегрирования контролировался баланс массы и производился учет всех гидрометеоров.

В целом, поток влаги в данном районе направлен с запада на восток, за исключением северной части Европы, где меридиональная составляющая приобретает существенную роль и поток влаги имеет выраженную направленность на северо-восток. Максимальное количество влаги содержится у

поверхности Земли и с высотой ее количество быстро уменьшается до практически нулевых значений на высотах 200 гПа. В слое от 900 гПа до 850 гПа наблюдается инверсия влаги и вторичный максимум – на высоте примерно 850 гПа. В сезонном ходе максимальные значения потока влаги наблюдаются в зимний период, когда наиболее активна циклоническая деятельность, а в летний период значения потоков влаги минимальны. Анализ межгодовой изменчивости показал, что с 1979 по 2010 годы ярко выраженных трендов в переносе влаги не наблюдалось, однако после 2010 года происходит существенное увеличение потоков влаги, приносимой на европейский континент (до 15 кг/мс, то есть примерно на 30%). Все реанализы показали хорошую согласованность с данными измерений.

Для анализа экстремальных потоков влаги влагоперенос был аппроксимирован распределением Фишера-Типпета, из которого были получены значения переносов влаги, соответствующие разным процентным точкам этого распределения. Было показано, что интегральный перенос влаги преимущественно контролируется экстремальными значениями переноса. При расчете дивергенции влаги используется ветер и удельная влажность. Для анализа относительного вклада этих величин в общую изменчивость переноса влаги отдельно были проанализированы тренды для ветра и удельной влажности и было получено, что наблюдаемое увеличение влагопереноса связано, в основном, с увеличением удельной влажности.

Исследование связи между переносом влаги и осадками показало, что эта связь весьма нетривиальна и напрямую связать их очень сложно. Поэтому было выбрано несколько точек на границе Европы и произведен трекинг траекторий переноса влаги для этих точек. Затем в соответствующих точках траекторий перемещения влаги были проанализированы осадки. Для некоторых траекторий интенсификация осадков происходила примерно через 2-3 суток после пересечения потоками береговой линии.

В заключение были сделаны следующие выводы:

- средние климатические характеристики влагопереноса из Атлантики в Европу достаточно хорошо согласованы, по данным разных реанализов и результатам зондирований атмосферы;

- наблюдается очевидный рост интенсивности влагопереноса с Атлантики в Европу после 2010 года (~15 кг/мс ~ 30%) при отсутствии тренда до 2010 года;

- суммарный перенос влаги в значительной степени контролируется экстремальными величинами;

- связь переноса влаги с осадками нетривиальна, и удастся обнаружить скорее интегральный эффект;

- наблюдается отклик в осадках на экстремальные переносы влаги, и он, в основном, связан с горными районами Центральной и Южной Европы.

Ю.П. Переведенцев, Б.Г. Шерстюков, К.М. Шанталинский
Региональные проявления современного потепления
(на примере Поволжского региона)

Климатические исследования на востоке Русской равнины берут свое начало с 1(13) января 1812 г., с момента открытия в Казанском университете (КУ) Метеорологической обсерватории (МО). Это позволило проследить за ходом региональных климатических изменений почти за 200-летний период времени. Особый интерес вызывают климатические события, происходящие в регионе на фоне глобального потепления климата, изучению которых способствует развитие современных информационно-вычислительных технологий и свободный доступ к метеорологическим данным и данным реанализов.

В этом сообщении рассматриваются пространственно-временные изменения основных климатических показателей на территории Приволжского федерального округа (ПФО) в период с 1828 по 2020 гг. с учетом барикоциркуляционных процессов, происходящих в Северном полушарии. В качестве исходных материалов использовались данные о приземной температуре воздуха (ТВ) по всему Земному шару (1850-2020 гг.) Отдела исследований климата университета Восточной Англии (CRU), реанализов (1950-2020 гг.), а также 183-х метеостанций на территории Приволжского федерального округа (данные из фонда ВНИИГМИ-МЦД за 1966-2018 гг.). Кроме того, рассматривались результаты многолетних наблюдений в МО Казанского университета в период 1828-2020 гг. и 12-ти длиннорядных станций на территории ПФО за 1888-2018 гг. Изложим кратко результаты, часть из которых более полно представлена в публикациях авторов (Переведенцев и др., 2017, 2019, 2020, 2021).

Рассмотрим вначале долгопериодные колебания температуры воздуха в Северном полушарии (СП) и в регионе в 1850-2020 гг. С этой целью, по данным CRU и МО КУ, определялись аномалии среднегодовой температуры воздуха (СГТВ) относительно норм 1961-1990 гг. Выделение долгопериодных колебаний в полученных временных рядах производилось с помощью низкочастотного фильтра Поттера с точкой отсечения 25 лет. Анализ кривых низкочастотных колебаний (НЧК) показал, что до середины 1970-х годов изменения СГТВ (среднегодовая температура приземного воздуха), осредненной по территории СП, и в Казани носили противофазный характер, который сменился затем однонаправленным ростом. При этом если в СП в последние 43 года (1976-2018 гг.) СГТВ увеличилась на 0.78°C , то в Казани она возросла на 1.22°C со скоростью $0.30^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Более детальный анализ по изучению долгопериодных колебаний температуры с учетом сезонности был выполнен для периода 1888-2020 гг. (133 года) с использованием данных 12 длиннорядных станций ПФО и CRU. Выявилось, что с 1970-х годов по 2020 г. СГТВ в ПФО повысилась на 1.8°C , а в СП на 1.3°C . В зимний период за 133-летний период температура воздуха в ПФО повысилась на 4.6°C (начиная с 1970-х годов на 3.5°C). В летний период отмечаются квазисинхронные колебания ТВ в ПФО и СП. В заключительный период (1970-2020 гг.) отмечен следующий характер потепления: по всему СП СГТВ повысилась

на 1.3°C, в ПФО – на 2.16°C; зимой ТВ СП повысилась 1.34°C, а в ПФО, соответственно, на 3.55°C; летом ТВ СП повысилась на 1.18°C, а в ПФО в период 1976-2012 гг. на 1.59°C (в последние годы она понизилась на 0.26°C). Таким образом, в ПФО колебания ТВ более значительны, а потепление в последние десятилетия происходит более интенсивно, чем в целом по СП.

Пространственно-временная изменчивость температуры воздуха и атмосферных осадков на территории ПФО исследована с использованием данных 183 метеостанций за 1966-2018 гг. Значения СГТВ понижаются с юго-запада от 6.9°C (ст. Саратов) до 0.5°C (ст. Ныроб). В центре региона они укладываются в интервал 3.0-4.0°C.

Наиболее суровые условия формируются на северо-востоке Пермского края и в возвышенных районах Башкортостана. В январе средняя многолетняя температура повышается от -16.3°C (северо-восток) до -8.8°C (юго-запад). В июле изотермы принимают зональный характер; средняя июльская ТВ увеличивается от 17.1°C (северо-восток) до 22.5°C (юго-восток). Построенные линейные тренды показывают, что наиболее значительные повышения ТВ произошли в январе и феврале. Величина коэффициента наклонного тренда (КНЛТ) в январе меняется в пределах 0.53-1.25°C/10 лет; в июле КНЛТ меняется в пределах 0.29-0.56°C/10 лет, а наименьшие изменения термического режима происходят весной. Станции с отрицательными значениями трендов за этот период отсутствуют.

В целом за год для всех станций отмечается рост температур со скоростью 0.27-0.57°C/10 лет. Следствием этого является рост годовых сумм среднесуточных температур (ТВ > 10°C) со скоростью от 45°C/10 лет (северо-восток) до 120°C/10 лет (юго-запад) и числа дней со среднесуточной ТВ, превышающей 10°C, до 4.5 дней/10 лет.

Годовая сумма атмосферных осадков в среднем по ПФО составляет около 530 мм. В северной части (ст. Киров, АМСГ) годовая сумма осадков составляет 655 мм, а на юго-востоке округа их выпадает всего ~270 мм. На распределение осадков большое влияние оказывают особенности подстилающей поверхности, реки и водохранилища, распределение возвышенностей. В целом по округу наблюдается рост годовых сумм осадков со скоростью от 2.2 мм/10 лет (ст. Пенза, ГМО) до 30.6 мм/10 лет (ст. Ныроб, АМСГ) за исключением юго-востока – на ст. Оренбург, ЗГМО отмечается их слабое уменьшение со скоростью -2.9 мм/10 лет. В (Переведенцев и др., 2020) более детально рассмотрены особенности температурно-влажностного режима на территории ПФО за рассматриваемый период.

Для оценки влияния циркуляции атмосферы на термический режим региона рассчитывались коэффициенты корреляции r за 120-летний период между временными рядами индексов атмосферной циркуляции (АО, NAO, EAWR, SCAND) и температурой воздуха на отдельных станциях. Были построены карты корреляции для января и июля. Выявились следующие особенности.

В январе с арктической осцилляцией (АО) связи более тесные на западе региона; в направлении с запада на восток происходит их ослабление в Предуралье ($r = 0.4$). В июле связи незначимы.

С индексом североатлантического колебания (NAO) в январе также связи более тесные в западной части региона ($r = 0.6$); в восточном направлении происходит заметное ослабление влияния NAO, а на юго-востоке ЕЧР r уменьшается до 0.2 и меньших значений (Оренбург). В июле значения коэффициентов корреляции незначительны ~ 0.2 .

Таким образом, арктическая осцилляция и североатлантическое колебание оказывают заметное воздействие на термический режим региона в зимний период и прежде всего на его западную часть. Это воздействие положительное, т.е. атмосферная циркуляция способствует потеплению региона в зимний период. Циркуляционная мода Восточная Атлантика-Западная Россия (EAWR) наибольшее влияние оказывает в летний период и в основном на центр и, особенно, на восток региона, где $r = -0.6$, что свидетельствует об охлаждающем влиянии Северной Атлантики в этот период. Связь температуры воздуха с индексом SCAND в январе лучше выражена в центре и особенно на востоке территории (Урал, Оренбуржье), где r принимает отрицательное значение ($r = -0.6$). Таким образом, формирование блокирующего скандинавского антициклона заметно влияет на зимний термический режим востока ЕЧР и способствует понижению ТВ. В июле связь между компонентами лучше на северо-западе ЕЧР ($r = 0.4$); она ослабевает в направлении юго-востока.

В заключение отметим следующее.

Долгопериодные колебания СГТВ в Казани в значительной степени согласуются с колебаниями приземной ТВ, осредненной по СП. Кривые НЧК имеют значительное сходство, однако современное значительное потепление в Казани началось с 1960 г., т.е. на 15 лет раньше, чем в целом по СП. При этом величина аномалии ТВ в заключительный период составила в Казани 1.22°C , а по всему СП лишь 0.78°C .

Анализ низкочастотных компонент ТВ 12 длиннорядных станций (1888-2020 гг.) позволил выделить однородные периоды с повышением (понижением температуры), оценить величину и скорость этих изменений во времени на всей территории Среднего Поволжья и Предуралья.

В период 1966-2018 гг. на территории ПФО происходит рост СГТВ со скоростью от 0.27 до $0.57^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Выявлена тенденция уменьшения числа дней в году с минимальной температурой ниже 20°C и увеличения – с максимальной температурой выше 25°C . Наблюдается рост экстремальности температуры воздуха в ПФО и повторяемости опасных явлений.

Выявлено, что годовая сумма атмосферных осадков в целом по ПФО возрастает. При этом заметный прирост осадков происходит в основном в весеннее и ранее летнее время; в июле на большей части ПФО осадки уменьшаются.

Выявлены достоверные корреляционные связи между среднемесячными значениями ТВ и индексами атмосферной циркуляции NAO, AO, SCAND, EAWR.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-55-00014).

Е.И. Хлебникова, И.М. Школьник, Ю.Л. Рудакова

Статистическая интерпретация климатических данных для обеспечения потребностей экономики РФ

Климатологическое обслуживание экономики предполагает обеспечение потребителей информацией о состоянии климата и имеет в России давнюю (более чем 100-летнюю) историю (Катцов, 2015). За это время со стороны потребителей заметно повысились требования к предоставляемой информации, и появилось много разных видов климатической продукции. Однако наиболее распространенным является традиционное предоставление информации о различных характеристиках, получаемых путем обобщения данных метеорологических наблюдений на длительных (многолетних) интервалах в предположении стационарности климата.

С точки зрения производителей климатической продукции существенным в методологическом отношении является общемировое научное признание современных изменений климата и необходимости адаптации к ним. В свете этого к числу важнейших задач Глобальной Рамочной Основы Климатического Обслуживания (ГРОКО), утвержденной ВМО в 2012 г., было отнесено «обеспечение поддержки адаптации к изменениям климата на всех уровнях путем разработки и внедрения в практику научно-обоснованных информационных продуктов о современном климате и предсказании его изменений». В современных условиях принятие климатически обусловленных решений в экономике требует учета не только данных наблюдений, но и информации о результатах моделирования будущего климата. При этом выбор той или иной базовой гипотезы при обработке данных должен осуществляться с учетом неопределенности оценок, обусловленной собственной изменчивостью климатической системы.

Получение перспективных оценок климатического воздействия на экономику является первоочередной задачей климатологического обоснования стратегий адаптации к ожидаемым изменениям климата. В докладе обсуждаются возможности и результаты применения технологии вероятностного прогнозирования регионального климата для целей адаптации в РФ (Катцов и др., 2020). Центральным элементом данной технологии является региональная климатическая модель (Школьник Ефимов, 2015; Shkolnik et al., 2018), разработанная в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, которая обеспечивает горизонтальное разрешение 25 км по всей территории России. Задание граничных условий на поверхности океана осуществлялось на основе расчетов температуры поверхности океана и сплоченности морского льда по пяти глобальным моделям CMIP5. Представлены результаты численных экспериментов, которые проводились от разных (случайных) начальных условий в атмосфере и на подстилающей поверхности суши для базового десятилетнего периода конца XX века (1990-1999 гг.) и периодов 2050-2059 гг. и 2090-2099 гг. с применением сценария RCP8.5. Для каждого из рассматриваемых 10-летних периодов было проведено по 50 экспериментов.

Для изучения будущих воздействий термического режима привлекался ряд показателей, имеющих универсальное назначение, в частности, годовые и сезонные экстремумы температуры воздуха заданного периода осреднения, которые определялись по данным о суточной минимальной, суточной максимальной и средней суточной температуре воздуха, а также характеристики внутригодовых периодов с температурой воздуха выше/ниже пороговых значений. В качестве пороговых значений выбирались уровни, критически важные для обеспечения потребностей строительства, наземного транспорта, энергетики.

В картированном виде представлены медианные ансамблевые оценки изменения таких характеристик, как продолжительность и градусо-сутки отопительного периода, число дней с суточной минимальной температурой ниже -30°C , число дней с суточной максимальной температурой выше $+30^{\circ}\text{C}$, число дней с переходом температуры воздуха через 0°C , индекс потребления в летний сезон.

Высокое горизонтальное разрешение используемой региональной модели дает возможность учета мезомасштабной изменчивости и обеспечивает лучшее воспроизведение экстремальных явлений по сравнению с глобальными моделями. Формирование большого ансамбля расчетов способствовало повышению достоверности полученных оценок и позволило уверенно диагностировать изменения для различных показателей, характеризующихся высоким уровнем естественной изменчивости, в первую очередь, для показателей экстремальности осадков (Хлебникова и др., 2019б).

Наряду с получением медианных ансамблевых оценок изменения средних значений выполнен анализ будущих изменений рассматриваемых показателей в вероятностном аспекте (Катцов и др., 2020; Хлебникова и др., 2021). На примере важных характеристик экстремальности термического режима и режима увлажнения теплого сезона продемонстрированы основные региональные особенности процесса антропогенного потепления в ближайшие десятилетия с учетом вклада внутренней климатической изменчивости. Выявлены различия в характере антропогенного потепления в Европейской части России и в отдельных регионах Азиатской части России, которые хорошо согласуются с современными данными наблюдений.

Степень существенности ожидаемых изменений хорошо проявляется при анализе рисков угрожающих событий, которые могут привести к возникновению крупных ущербов. С точки зрения надежности функционирования различных конструкций, объектов инфраструктуры и систем жизнеобеспечения принципиальным является соответствие реальных климатических условий тем нормативам экстремальности, которые задавались при их проектировании. Используемый ансамблевый подход дал возможность произвести вероятностную оценку рисков различных неблагоприятных событий, связанных с изменением климатических показателей экстремальности (Хлебникова и др., 2019а).

Е.П. Гордов

От статистической климатологии и климатического моделирования к цифровым двойникам климатических процессов

Современная климатология опирается на интеграцию инструментальных наблюдений, моделирования и анализ пространственных данных, позволяющие осуществлять мониторинг и прогнозирование климатических процессов и их последствий. Становление количественной климатологии, существенный вклад в которое внес Г.В. Груза, является таким значимым этапом климатической науки, который позволяет посмотреть на ее дальнейшую эволюцию и перспективные направления.

Основными направлениями развития климатологии в последние годы являются генерация данных, характеризующих состояние окружающей среды (прошлое, настоящее и возможное в будущем), превращение этих данных в доступную для пользователей информацию, создание новых моделей и методов анализа климатической информации для извлечения из нее знания о климатических процессах и переход к решению прикладных задач климатологии, дающих возможность разрабатывать меры адаптации к климатическим изменениям и уменьшать их негативные последствия.

Достиженные результаты привели к тому, что сейчас магистральным направлением климатической науки становится создание такой ее информационно-вычислительной инфраструктуры, которая сможет не только справиться с вызовами трансформации ее в область с интенсивным использованием данных, но и удовлетворить запросы пользователей, вызванные заметными негативными последствиями изменений климата.

Действительно, развитие инструментов и сетей мониторинга (автоматические метеостанции, буи, спутники) и развитие и трансформация климатических моделей в модели системы Земля уже привело к появлению петабайтных коллекций данных. Для их хранения и обеспечения доступа к ним в мире созданы центры данных (Г.В. Груза участвовал в создании такого центра в Обнинске) и сетевая инфраструктура, обеспечивающая доступ к ним. Рост объемов данных привел к трансформации центров данных в платформы их анализа и визуализации полученных результатов. Они позволяют удаленно выполнять глубокий статистический анализ больших массивов климатической информации, визуализировать полученные результаты в виде цифровых карт и экспортировать их для дальнейшего анализа. Эти карты дают основу для практических приложений, которые можно выполнять, используя тематическое программное обеспечение и применяемые для решения прикладных задач ГИС. Хотя результат этого развития и имеет множество названий – кибер-инфраструктура, научные порталы и т.д., – наиболее полно его суть отражается в названии виртуальная исследовательская среда (ВИС). Элементы ВИС и описание их функциональности легко найти в Интернете.

Растущие угрозы последствий происходящих и ожидаемых климатических изменений стимулируют развитие как фундаментальной, так и прикладной климатической науки. Население, власть и промышленность мало интере-

суют физические механизмы климатических процессов. Для таких пользователей климатической информации более важны способы адаптации к изменениям климата и уменьшения их негативных последствий, т.е. все то, что можно назвать климатическими сервисами и услугами. Всемирная метеорологическая организация (ВМО) отреагировала на востребованность таких услуг, инициировав Глобальную рамочную основу климатического обслуживания (ГРОКО) (<https://public.wmo.int/en/programmes/world-climate-services-programme>) и создание поддерживающей ее информационно-вычислительной инфраструктуры.

Однако планируемый сейчас многими правительствами переход к безуглеродной экономике требует от участников действий, для понимания последствий которых необходимо иметь набор решений для возникающих разнородных задач. Ясно, что ни развитие инструментальных наблюдений, моделирования и анализа, ни развитие существующих элементов ВИС-анализа климатических изменений и их последствий не может решить задачу обеспечения пользователей необходимыми им решениями. Согласно рекомендациям Национальной академии наук США (Global Change Research Needs..., 2021), для этого должны быть выполнены интегрированные фундаментальные исследования оценки рисков, вызванных климатическими изменениями, учитывающие, в частности, взаимодействие между секторами экономики, регионами и структурами, принимающими решения, и взаимозависимость мер по адаптации, уменьшению негативных последствий и декарбонизации энергетики. Конечно, это потребует и развития наблюдательных сетей, моделей, и климатической аналитики. В то же время, для получения ответов на все запросы потребителей необходим подход, который гармонично объединяет эти направления климатической науки на основе современных решений, предлагаемых информационно-вычислительными технологиями.

Для решения этой задачи в настоящее время перспективным выглядит использование цифровых двойников климатических процессов и систем. Цифровой двойник может быть определен как постоянно меняющийся цифровой профиль физического объекта или процесса, использующий исторические и актуальные данные измерений и моделирования для прогноза поведения или отклика на изменение внешних условий. Он основан на огромном объеме накопленных пространственных данных, полученных в ходе предшествующих и текущих измерений и моделирования целого ряда показателей объекта/процесса в реальном мире. Анализ накопленных и поступающих данных позволяет получать точную информацию о физическом объекте или процессе, прогнозировать его поведение и взаимодействие с другими системами, а также исследовать возможность управления поведением объекта и процессами его взаимодействия с другими системами. Конечно, интегрированная в цифровой двойник модель должна иметь адекватную, использующую технологии Интернета вещей систему усвоения актуальных данных измерений, уровень которой не уступает системам, используемым в современных моделях прогноза погоды. Оперативный анализ результатов прогнозного моделирования должен выполняться с привлечением нейронных сетей.

На создание цифровых двойников климатических систем и процессов в мире уже направлено несколько проектов. Наиболее масштабной и перспективной выглядит рассчитанная на 10 лет инициатива Европейского Союза по созданию цифрового двойника нашей планеты (Bauer et al., 2021). В ее рамках будет создана цифровая модель Земли высокого (до 1 км для Европы) горизонтального разрешения, которая станет основой для мониторинга и прогноза естественных и антропогенных процессов. Базирующиеся на непрерывных наблюдениях, моделировании и высокопроизводительных расчетах цифровые двойники (два первых: «Погодные и геофизические экстремальные явления» и «Адаптация к климатическим изменениям») дадут пользователям высококачественную информацию, сервисы, модели, сценарии, прогнозы и инструменты визуализации возможных в будущем явлений и их последствий. Планируется создание такой открытой и гибкой программной инфраструктуры, которая даст возможность и пользователям-неспециалистам вмешиваться в поток вычислений и получать ответы на свои конкретные запросы.

Современный уровень информационно-вычислительных технологий (модели, усвоение данных, виртуальная исследовательская среда с облачными хранилищами и вычислениями, Интернет вещей и машинное обучение) уже дает необходимую основу для создания цифровых двойников экосистем (леса, поля, луга, болота, водоемы и т.д.), решающих задачу мониторинга и контроля обмена парниковыми газами экосистем и атмосферы. Цифровые двойники процессов и систем могут дать инструменты для адаптации к климатическим изменениям, контроля и, в конечном счете, управления вкладом земной поверхности в баланс углерода. Имея эту научную основу, можно реализовать программы компенсации промышленных выбросов парниковых газов, необходимые для перехода к «зеленой» экономике.

Работа выполнена в рамках проектов 121031300158-9 и FWNW-2021-0006.

Заключение

Развитие климатологии в XX - XXI веках в значительной мере повторило развитие математики в отношении предмета исследования. В математике постепенно от изучения объектов – точек, кривых, поверхностей, числовых множеств и множеств более сложной природы – фокус смещался в сторону изучения преобразований этих объектов – операторов, отображений. В климатологии, которая на начальном этапе своего развития более всего напоминала статистику метеорологических величин и явлений при условии стационарности климата, произошло похожее смешение фокуса. От изучения предположительно неизменного (в статистическом смысле) состояния климата на основе все расширяющейся базы результатов наблюдений основное внимание сместилось на изучение тенденций, трендов, направленных реакций климатической системы на изменение уровня внешнего воздействия или внутренних факторов, в том числе антропогенного изменения газового и аэрозольного состава атмосферы. Это стимулировало новое развитие методологий в климатологической науке, в том числе – глубокий синтез методов статистической

климатологии и математического моделирования климатической системы Земли и земной системы в целом. Одновременно это позволило климатологам все более успешно отвечать на практические запросы, связанные с формированием климатической политики как на национальном, так и на международном уровне в связи с задачами ограничения современного антропогенного изменения климата.

Доклады ведущих российских ученых-климатологов, представленные на Научных чтениях памяти выдающегося российского климатолога Георгия Вадимовича Груза (1931-2020 гг.), которые прошли в Институте глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля 10 ноября 2021 г., показали, что в этом направлении достигнут существенный прогресс и наблюдается дальнейшее интенсивное развитие.

Список литературы

Алексеев, Г.В. (2014) Арктическое измерение глобального потепления, *Лед и снег*, № 2 (126), с. 53-68.

Алексеев, Г.В. (2015) Проявление и усиление глобального потепления в Арктике, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 1, с. 11-26.

Алексеев, Г.В., Вязилова, А.Е., Глок, Н.И., Иванов, Н.Е., Харланенкова Н.Е. (2019) Влияние аномалий температуры воды в низких широтах океана на колебания климата Арктики и их предсказуемость, *Арктика: экология и экономика*, № 3 (35), с. 73-83.

Алексеев, Г.В., Кузмина, С.И., Глок, Н.И. (2017) Влияние аномалий температуры океана в низких широтах на атмосферный перенос тепла в Арктику, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 1, с. 106-123.

Бабина, Е.Д., Семенов, В.А. (2019). Внутримесячная изменчивость среднесуточной приземной температуры на территории России в период 1970-2015 гг., *Метеорология и гидрология*, № 8, с. 21-33.

Бардин, М.Ю. (2007) Антициклоническая квазистационарная циркуляция и ее влияние на аномалии и экстремумы температуры воздуха в западных областях России, *Метеорология и гидрология*, № 2, с. 5-17.

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В. (2019) Долгопериодные вариации показателей экстремальности температурного режима на территории России и их связи с изменениями крупномасштабной атмосферной циркуляции и глобальным потеплением, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 5-15.

Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф. (2019) Изменчивость антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 3, с. 32-58.

Бардин М.Ю., Платова Т.В. (2020) Изменения сезонных показателей экстремумов температуры воздуха в Москве и центральных областях европейской части России, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 20-35.

ВМО (2019) *Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО, № 485.*

Груза, Г.В., Поляк, И.И., Шахмейстер, В.А. (1979) О пространственно-временной статистической структуре среднего месячного геопотенциала 500 мб, *Метеорология и гидрология*, № 4, с. 35-43.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (1983) *Вероятностные метеорологические прогнозы*, Л., Гидрометеиздат, 271 с.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (1979) *Данные о структуре изменчивости климата. Температура воздуха на уровне моря. Северное полушарие*, Обнинск Репрогр. ВНИИГМИ-МЦД, 201 с.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я. (1980) *Структура и изменчивость наблюдаемого климата. Температура воздуха Северного полушария*, Л., Гидрометеиздат, 72 с.

Катцов, В.М. (2015) Климатическое обслуживание Российской Федерации: вчера, сегодня, завтра, В сб.: *Труды VII Всероссийского метеорологического съезда*, СПб., Д Арт, с. 66-80.

Катцов, В.М., Хлебникова, Е.И., Школьник, И.М., Рудакова, Ю.Л. (2020) Вероятностное сценарное прогнозирование регионального климата как основа разработки адаптационных программ в экономике Российской Федерации, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 46-58.

Кислов, А.В., Антипина, У.И., Корнева, И.А. (2021) Экстремальные осадки европейского сектора Арктики в летний период: статистика и синоптические модели, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 20-34, doi: 10.52002/0130-2906-2021-7-20-34.

Мохов, И.И. (2020) Аномальные зимы в регионах Северной Евразии в разных фазах явлений Эль-Ниньо, *ДАН*, т. 493, № 2, с. 93-98.

Мохов, И.И. (2021) Экстремальные атмосферные и гидрологические явления в российских регионах: связь с Тихоокеанской десятилетней осцилляцией, *ДАН. Науки о Земле*, т. 500, № 2, с. 183-188.

Мохов, И.И. (2022). Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования, *Вестник РАН*, т. 92, № 1, с. 3-14.

Мохов, И.И. (2022) Изменения частот фазовых переходов разных типов явлений Эль-Ниньо в последние десятилетия, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 58, № 1, с. 3-9.

Мохов, И.И., Акперов М.Г. (2006) Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа, *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 42, № 4, с. 467-475.

Мохов, И.И., Бондур, В.Г., Ситнов, С.А., Воронова, О.С. (2020) Космический мониторинг природных пожаров и эмиссий в атмосферу продуктов горения на территории России: связь с атмосферными блокировками, *ДАН. Науки о Земле*, т. 495, № 2, с. 61-66.

Мохов, И.И., Елисеев, А.В., Гурьянов, В.В. (2020) Модельные оценки глобальных и региональных изменений климата в голоцене, *ДАН. Науки о Земле*, т. 490, № 1, с. 27-32.

Мохов, И.И., Макарова, М.Е., Порошенко, А.Г. (2020) Тропические циклоны и их трансформирование во внетропические: оценки полувекových тенденций изменения, *ДАН. Науки о Земле*, т. 493, № 1, с. 83-88.

Мохов, И.И., Парфенова, М.Р. (2021) Связь протяженности антарктических и арктических морских льдов с температурными изменениями в 1979-2020 гг., *ДАН. Науки о Земле*, т. 496, № 1, с. 71-77.

Мохов, И.И., Семенов, В.А. (2016) Погодно-климатические аномалии в российских регионах в связи с глобальными изменениями климата, *Метеорология и гидрология*, № 2, с. 16-28.

Мохов, И.И., Смирнов, Д.А. (2022) Эмпирические оценки вклада парниковых газов и естественной климатической изменчивости в тренды приповерхностной температуры для различных широт, *ДАН. Науки о Земле*, т. 503, № 1, с. 48-54.

Мохов, И.И., Тимажев, А.В. (2022) Повторяемость летних атмосферных блокирований в Северном полушарии в разных фазах явлений Эль-Ниньо, Тихоокеанской десятилетней и Атлантической мультидесятилетней осцилляций, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 58 (в печати).

Переведенцев, Ю.П., Васильев, А.А., Шанталинский, К.М., Гурьянов В.В. (2017) Климатические изменения приземных полей атмосферного давления и температуры воздуха в умеренных широтах Северного полушария, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 81-93.

Переведенцев, Ю.П., Васильев, А.А., Шерстюков, Б.Г., Шанталинский, К.М. (2021) Климатические изменения на территории России в конце XX – начале XXI века, *Метеорология и гидрология*, № 10, с. 14-26.

Переведенцев, Ю.П., Шерстюков, Б.Г., Шанталинский, К.М., Гурьянов, В.В., Аухадеев, Т.Р. (2020) Климатические изменения в Приволжском федеральном округе в XIX-XXI веках, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 36-46.

Переведенцев, Ю.П., Шумихина, А.В., Шанталинский, К.М., Гурьянов, В.В. (2019) Опасные гидрометеорологические явления на территории Приволжского федерального округа, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 20-30.

Ранькова, Э.Я., Бардин, М.Ю. (2021) Научная деятельность Г.В. Груза (1931-2021) Краткий комментарий к библиографии, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 2, с. 5-25.

Ситнов, С.А., Мохов, И.И. (2018) Сравнительный анализ характеристик пожаров в бореальных лесах Евразии и Северной Америки по спутниковым данным, *Исследование Земли из космоса*, № 2, с. 21-37.

Федоров, В.М. (2018) *Инсоляция Земли и современные изменения климата*, М., Физматлит, 232 с.

Хлебникова, Е.И., Рудакова, Ю.Л., Салль, И.А., Ефимов, С.В., Школьник, И.М. (2019а) Изменение показателей экстремальности термического режима в XXI веке: ансамблевые оценки для территории России, *Метеорология и гидрология*, № 3, с. 11-23.

Хлебникова, Е.И., Рудакова, Ю.Л., Школьник, И.М. (2019б) Изменение режима атмосферных осадков на территории России: результаты регионального климатического моделирования и данные наблюдений, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 5-16.

Хлебникова, Е.И., Школьник, И.М., Рудакова, Ю.Л. (2021) Вероятностные оценки прикладных показателей термического режима для целей адаптации к изменениям климата на территории России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 2, с. 140-158, doi:10.21513/2410-8758-2-140-158.

Черенкова, Е.А., Бардин, М.Ю., Платова, Т.В., Семенов, В.А. (2020) Влияние долгопериодной изменчивости температуры поверхности океана в Северной Атлантике и изменений атмосферной циркуляции на формирование сильных атмосферных засух летом на юге Восточно-Европейской равнины, *Метеорология и гидрология*, № 12, с. 5-19.

Черногаева, Г.М., Журавлева, Л.Р., Малеванов, Ю.А., Пешков, Ю.В., Котлякова, М.Г., Красильникова, Т.А. (2021) *Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год*, Москва, Росгидромет, 205 с.

Школьник, И.М., Ефимов, С.В. (2015) Региональная климатическая модель нового поколения для территории северной Евразии, *Труды ГГО*, вып. 576, с. 201-211.

Alekseev, G. (2021) Rise of Insolation of Low Latitudes Affects Arctic Warming, *Glob. Scient. Res. Env. Sci.*, vol. 1, issue 3, pp. 1-3, doi: 10.53902/GSRES.2021.01.000514.

Alekseev, G.V., Glok, N.I., Vyazilova, A.Ye., Kharlanenkova, N.Ye. (2020) *Climate change in the Arctic: causes and mechanisms*, IOP Conference Series, EES 606, EESE6061(002).

Alekseev, G.V., Kuzmina, S., Bobylev, L., Urazgildeeva, A., Gnatiuk, N. (2019) Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming, *Int. J. Climatol.*, pp. 1-11, available at: <https://doi.org/10.1002/joc.6040>.

Alekseev, G.V., Glok, N.I., Vyazilova, A.E., Kharlanenkova, N.E., Kulakov, M.Y. (2021) Influence of SST in Low Latitudes on the Arctic Warming and Sea Ice, *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, 1145, available at: <https://doi.org/10.3390/jmse9101145>.

Aleshina, M.A., Semenov, V.A., Chernokulsky, A.V. (2021) A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data, *Env. Res. Lett.*, vol. 16, L105004, doi:10.1088/1748-9326/ac1cba.

Barnston, A.G., Livezey, R.E (1987) Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns, *Mon. Wea. Rev.*, vol. 115, pp. 1083-1126.

Bauer, P., Stevens, B., Hazeleger, W. (2021) A digital twin of Earth for the green transition, *Nat. Clim. Chang*, vol. 11, pp. 80-83, available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00986-y>.

Bekryaev, R.V., Polyakov, I.V., Alexeev, V.A. (2010) Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming, *J. Climate*, vol. 23, pp. 3888-3906.

Borisenkov, E.P., Tsvetkov, A.V., Agaponov, S.V. (1983) On some characteristics of insolation changes in the past and the future, *Clim. Change*, vol. 5, pp. 237-244.

Dommenget, D. (2009) The ocean's role in continental climate variability and change, *Journal of Climate*, vol. 22(18), pp. 4939-4952, available at: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2778.1>.

Extreme events (2007) *Proceedings Hawaiian Winter Workshop University of Hawaii at Manoa, January 23-26, 2007*, in P. Muller, C. Garrett, D. Henderson (eds.), SOEST Special Publication.

Holton, J.R., Hakim, G.J. (2013) *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 5th Edition, Academic Press, Cambridge, 552 p., available at: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63394-8>.

IPCC (2021) *Summary for Policymakers, Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press.

Katz, R.W. (1999) Extreme value theory for precipitation: sensitivity analysis for climate change, *Adv. Water Resources*, vol. 23, pp. 133-139, available at: [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(99\)00017-2](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(99)00017-2).

Kislov, A., Matveeva, T. (2016) An Extreme Value Analysis of Wind Speed over the European and Siberian Parts of Arctic Region, *Atmospheric and Climate Sciences*, vol. 6, pp. 205-223, available at: <https://doi.org/10.4236/acs.2016.62018>.

Kislov, A., Matveeva, T. (2020) The Monsoon over the Barents Sea and Kara Sea, *Atmospheric and Climate Sciences*, vol. 10, pp. 339-356, available at: <https://doi.org/10.4236/acs.2020.103019>.

Kislov, A., Matveeva, T. (2021) Extreme Values of Wind Speed over the Kara Sea Based on the ERA5 Dataset, *Atmospheric and Climate Sciences*, vol. 11, pp. 98-113, doi: 10.4236/acs.2021.111007.

Koenker, R., Bassett, G. Jr. (1978) Regression Quantiles, *Econometrica*, vol. 46, no. 1, pp. 33-50.

Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A.M. et al. (2010) Precipitation downscaling under climate change. Recent developments to bridge the gap between dynamical

models and the end user, *Rev. Geophys.*, vol. 48, pp. 1-34; doi: 10.1029/2009RG000314.

Mokhov, I.I. (2021) Predictability of warm and cold winters: Assessment of El Niño effects in the North Eurasian regions, *arXiv*, available at: <https://arxiv.org/abs/2201.00050>.

Myslenkov, S., Platonov, V., Kislov, A., Silvestrova, K., Medvedev, I. (2021) Wave climate and storm activity in the Kara sea, *Water*, vol. 13, p. 648, doi: 10.3390/w13050648.

Global Change Research Needs and Opportunities for 2022-2031 (2021) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Washington, DC: The National Academies Press, available at: <https://doi.org/10.17226/26055>.

Newman, M. (2006) *Power laws, Pareto distributions and Zipf's law*, arXiv:cond-mat/0412004v3 [cond-mat.stat-mech].

Platonov, V., Kislov, A. (2020) High-Resolution COSMO-CLM Modeling and an Assessment of Mesoscale Features Caused by Coastal Parameters at Near-Shore Arctic Zones (Kara Sea), *Atmosphere*, vol. 11, p. 1062, available at: <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/10/1062>.

Shkolnik, I., Pavlova, T., Yefimov, S., Zhuravlev, S. (2018) Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario, *Climate Dynamics*, vol. 50, pp. 215-230, doi:10.1007/s00382-017-3600-6.

Sornette, D. (2009). Dragon-Kings, Black Swans and the Prediction of Crises, *International Journal of Terraspace Science and Engineering*, vol. 2, pp.1-18, available at: <https://doi.org/10.2139/ssrn.1596032>.

Sornette, D., Ouillon, G. (2012) Dragon-Kings: Mechanisms, Statistical Methods and Empirical Evidence, *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 205, pp.1-26, available at: <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01559-5>.

Taleb, N. (2007) Black swans and the domains of statistics, *The American Statistician*, vol. 61, no. 3, pp. 198-583, available at: <https://doi.org/10.1198/000313007X219996>.

Zolina O., Kapala A., Simmer C., Gulev S.K. (2004) Analysis of extreme precipitation over Europe from different reanalyses: a comparative assessment, *Global and Planetary Change*, vol. 44, pp. 129-161, doi:10.1016/j.gloplacha.2004.06.009.

References

Alekseyev, G.V. (2014) Arkticheskoye izmereniye global'nogo potepleniya [Arctic dimension of global warming], *Led i sneg*, no. 2(126), pp. 53-68.

Alekseyev, G.V. (2015) Proyavleniye i usileniye global'nogo potepleniya v Arktike [Manifestation and intensification of global warming in the Arctic], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 1, pp. 11-26.

Alekseyev, G.V., Vyazilova, A.Ye., Glok, N.I., Ivanov, N.Ye. Kharlanenkova, N.Ye. (2019) Vliyaniye anomaliiy temperatury vody v nizkikh shirotakh okeana na kolebaniya klimata Arktiki i ikh predskazuyemost' [Influence of water temperature anomalies in the low latitudes of the ocean on climate fluctuations in the Arctic and their predictability], *Arktika: ekologiya i ekonomika*, no. 3(35), pp. 73-83.

Alekseyev, G.V., Kuzmina, S.I., Glok, N.I. (2017) Vliyaniye anomaliiy temperatury okeana v nizkikh shirotakh na atmosferynyy perenos tepla v Arktiku [Influence of low-latitude ocean temperature anomalies on atmospheric heat transfer to the Arctic], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 1, pp. 106-123.

Babina, Ye.D., Semenov, V.A. (2019) Vnutrimesyachnaya izmenchivost' srednesutochnoy prizemnoy temperatury na territorii Rossii v period 1970-2015 gg. [Intra-month variability of the average daily surface temperature on the territory of Russia in the period 1970-2015], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 8, pp. 21-33.

Bardin, M.Yu. (2007) Antitsiklonicheskaya kvazistatsionarnaya tsirkulyatsiya i yeye vliyaniye na anomalii i ekstremumy temperatury vozdukha v zapadnykh oblastiakh Rossii [Anticyclonic quasi-stationary circulation and its influence on anomalies and extremes of air temperature in the western regions of Russia], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 2, pp. 5-17.

Bardin M.Yu., Platova T.V. (2019) Dolgoperiodnyye variatsii pokazately ekstremal'nosti temperaturnogo rezhima na territorii Rossii i ikh svyazi s izmeneniyami krupnomasshtabnoy atmosferynoy tsirkulyatsii i global'nym potepleniyem [Long-term variations in the indicators of extremeness of the temperature regime in Russia and their relationship with changes in large-scale atmospheric circulation and global warming], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, pp. 5-15.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Samokhina, O.F. (2019) Izmenchivost' antitsiklonicheskoy aktivnosti v umerennykh shirotakh severnogo polushariya [Variability of anticyclonic activity in the temperate latitudes of the northern hemisphere], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 3, pp. 32-58.

Bardin, M.Yu., Platova, T.V. (2020) Izmeneniya sezonnykh pokazately ekstremumov temperatury vozdukha v Moskve i tsentral'nykh oblastiakh yevropeyskoy chasti Rossii, *Meteorologiya i gidrologiya*, No 7, pp. 20-35.

WMO (2019) *Dopolneniye IV k Tekhnicheskomu reglamentu VMO*, [Appendix IV to WMO Technical Regulations], no. 485.

Gruza, G.V., Polyak, I.I., Shakhmeyster, V.A. (1979) O prostranstvenno-vremennoy statisticheskoy strukture srednego mesyachnogo geopotentsiala 500 mb [On the spatial-temporal statistical structure of the average monthly geopotential of 500 mb], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 4, pp. 35-43.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya. (1983) *Veroyatnostnyye meteorologicheskiye prognozy* [Probabilistic meteorological forecasts], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 271 p.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya. (1979) *Dannyye o strukture izmenchivosti klimata. Temperatura vozdukha na urovne morya. Severnoye polushariye* [Data on the structure of climate variability. Air temperature at sea level. North hemisphere], VNIIGMI-MTSD, Obninsk Reprgr., Russia, 201 p.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya. (1980) *Struktura i izmenchivost' nablyudayemogo klimata. Temperatura vozdukha Severnogo polushariya*. [Structure and variability of the observed climate. Air temperature of the Northern Hemisphere], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 72 p.

Kattsov, V.M. (2015) Klimaticheskoye obsluzhivaniye Rossiyskoy Federatsii: vchera, segodnya, zavtra, [Climate service of the Russian Federation: yesterday, today, tomorrow], *Trudy VII Vserossiyskogo meteorologicheskogo s"yezda*, D Art, St. Petersburg, Russia, pp. 66-80.

Kattsov, V.M., Khlebnikova, Ye.I., Shkol'nik, I.M., Rudakova Yu.L. (2020) Veroyatnostnoye stsenarnoye prognozirovaniye regional'nogo klimata kak osnova razrabotki adaptatsionnykh programm v ekonomike Rossiyskoy Federatsii [Probabilistic scenario forecasting of the regional climate as a basis for the development of adaptation programs in the economy of the Russian Federation], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5, pp. 46-58.

Kislov, A.V., Antipina, U.I., Korneva, I.A. (2021) Ekstremal'nyye osadki yevropeyskogo sektora Arktiki v letniy period: statistika i sinopticheskiye modeli [Extreme precipitation in the European sector of the Arctic in summer: statistics and synoptic models], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 7, pp. 20-34, doi: 10.52002/0130-2906-2021-7-20-34.

Mokhov, I.I. (2020) Anomal'nyye zimy v regionakh Severnoy Yevrazii v raznykh fazakh yavleniy El'-Nin'o [Anomalous winters in the regions of Northern Eurasia in different phases of the El Niño events], *DAN*, vol. 493, no. 2, pp. 93-98.

Mokhov, I.I. (2021) Ekstremal'nyye atmosferynye i gidrologicheskiye yavleniya v rossiyskikh regionakh: svyaz' s Tikhookeanskoy desyatiletney otsillyatsiyey [Extreme atmospheric and hydrological phenomena in Russian regions: connection with the Pacific decadal oscillation], *DAN. Nauki o Zemle*, vol. 500, no. 2, pp. 183-188.

Mokhov, I.I. (2022) Izmeneniya klimata: prichiny, riski, posledstviya, problemy adaptatsii i regulirovaniya [Climate Change: Causes, Risks, Consequences, Problems of Adaptation and Regulation], *Vestnik RAN*, vol. 92, no. 1, pp. 3-14.

Mokhov, I.I. (2022) Izmeneniya chastot fazovykh perekhodov raznykh tipov yavleniy El'-Nin'o v posledniye desyatiletiya [Changes in the frequencies of phase transitions of different types of El Niño phenomena in recent decades], *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*, vol. 58, no. 1, pp. 3-9.

Mokhov, I.I., Akperov, M.G. (2006) Vertikal'nyy temperaturnyy gradiyent v troposfere i yego svyaz' s pripoverkhnostnoy temperaturoy po dannym reanaliza [Vertical temperature gradient in the troposphere and its relation to near-surface

temperature from reanalysis data], *Izv. RAN Fizika atmosfery i okeana*, vol. 42, no. 4, pp. 467-475.

Mokhov, I.I., Bondur, V.G., Sitnov, S.A., Voronova, O.S. (2020) *Kosmicheskii monitoring prirodnykh pozharov i emissiy v atmosfere produktov goreniya na territorii Rossii: svyaz' s atmosfernymi blokirovaniyami* [Space monitoring of natural fires and atmospheric emissions of combustion products on the territory of Russia: connection with atmospheric blocking], *DAN. Nauki o Zemle*, vol. 495, no. 2, pp. 61-66.

Mokhov, I.I., Yeliseyev, A.V., Gur'yanov, V.V. (2020) Model'nyye otsenki global'nykh i regional'nykh izmeneniy klimata v golotsene [Model estimates of global and regional climate changes in the Holocene], *DAN. Nauki o Zemle*, vol. 490, no. 1, pp. 27-32.

Mokhov, I.I., Makarova, M.Ye., Poroshenko A.G. (2020) Tropicheskiye tsiklony i ikh transformirovaniye vo vnetropicheskiye: otsenki poluvekovykh tendentsiy izmeneniya [Tropical cyclones and their transformation into extratropical ones: estimates of half-century trends of change], *DAN. Nauki o Zemle*, vol. 493, no. pp. 83-88.

Mokhov, I.I., Parfenova, M.R. (2021) Svyaz' protyazhennosti antarkticheskikh i arkticheskikh morskikh l'dov s temperaturnymi izmeneniyami v 1979-2020 gg. [Relationship between Antarctic and Arctic sea ice extent and temperature changes 1979-2020], *DAN. Nauki o Zemle*, vol. 496, no. 1, pp. 71-77.

Mokhov, I.I., Semenov, V.A. (2016) Pogodno-klimaticheskiye anomalii v rossiyskikh regionakh v svyazi s global'nymi izmeneniyami klimata [Weather and climate anomalies in Russian regions due to global climate change], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 2, pp. 16-28.

Mokhov, I.I., Smirnov, D.A. (2022) Empiricheskiye otsenki vkladov parnikovykh gazov i yestestvennoy klimaticheskoy izmenchivosti v trendy pripoverkhnostnoy temperatury dlya razlichnykh shirot [Empirical estimates of the contribution of greenhouse gases and natural climatic variability to surface temperature trends for different latitudes], *DAN. Nauki o Zemle*, vol. 503, no. 1, pp. 48-54.

Mokhov, I.I., Timazhev, A.V. (2022) Recurrence of summer atmospheric blockings in the Northern Hemisphere in different phases of the El Niño events, the Pacific decadal and Atlantic multidecadal oscillations, *Izvestiya RAN. Physics of the Atmosphere and Ocean*, vol. 58 (in print).

Perevedentsev, Yu.P., Vasil'yev, A.A., Shantalinskiy, K.M., Gur'yanov, V.V. (2017) Klimaticheskiye izmeneniya prizemnykh poley atmosfernogo davleniya i temperatury vozdukh v umerennykh shirotakh Severnogo polushariya [Climatic changes in surface fields of atmospheric pressure and air temperature in the temperate latitudes of the Northern Hemisphere], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 7, pp. 81-93.

Perevedentsev, Yu.P., Vasil'yev, A.A., Sherstyukov, B.G., Shantalinskiy, K.M. (2021) Klimaticheskiye izmeneniya na territorii Rossii v kontse XX – nachale XXI

veka [Climate change in the Volga Federal District in the XIX-XXI centuries], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 10, pp. 14-26.

Perevedentsev, Yu.P., Sherstyukov, B.G., Shantalinskiy, K.M., Gur'yanov, V.V., Aukhadayev, T.R. (2020) Klimaticheskiye izmeneniya v Privolzhskom federal'nom okruge v XIX-XXI vekakh [Climate change in Russia in the late 20th – early 21st centuries], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 36-46.

Perevedentsev, Yu.P., Shumikhina, A.V., Shantalinskiy, K.M., Gur'yanov, V.V. (2019) Opasnyye gidrometeorologicheskiye yavleniya na territorii Privolzhskogo federal'nogo okruga [Dangerous hydrometeorological phenomena on the territory of the Volga Federal District], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, pp. 20-30.

Ran'kova, E.Ya., Bardin, M.Yu. (2021) Nauchnaya deyatel'nost' G.V. Gruza (1931-2021) Kratkiy kommentariy k bibliografii [Scientific activity of G.V. Gruza (1931-2021). Brief commentary on the bibliography.], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 7, no. 2, pp. 5-25.

Sitnov, S.A., Mokhov, I.I. (2018) Sravnitel'nyy analiz kharakteristik pozharov v boreal'nykh lesakh Yevrazii i Severnoy Ameriki po sputnikovym dannym [Comparative analysis of the characteristics of fires in the boreal forests of Eurasia and North America according to satellite data], *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, no. 2, pp. 21-37.

Fedorov, V.M. (2018) *Insolyatsiya Zemli i sovremennyye izmeneniya klimata* [Earth insolation and current climate change], Fizmatlit, Moscow, Russia, 232 p.

Khlebnikova, Ye.I., Rudakova, Yu.L., Sall', I.A., Yefimov, S.V., Shkol'nik, I.M. (2019a) Izmeneniye pokazateley ekstremal'nosti termicheskogo rezhima v XXI issledovanii: ansamblevyye otsenki dlya territorii Rossii [Earth insolation and current climate change], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 3, pp. 11-23.

Khlebnikova, Ye.I., Rudakova, Yu.L., Shkol'nik, I.M. (2019b) Izmeneniye rezhima atmosferykh vozdeystviy na territorii Rossii: rezul'taty klimaticheskogo modelirovaniya i dannyye obnaruzheniya [Changes in the Precipitation Regime on the Territory of Russia: Results of Regional Climate Modeling and Observational Data], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 7, pp. 5-16.

Khlebnikova, Ye.I., Shkol'nik, I.M., Rudakova, Yu.L. (2021) Chastotnyye prikladnyye otsenki pokazateley termicheskogo rezhima dlya adaptatsii k izmeneniyam klimata na territorii Rossii [Probabilistic estimates of applied indicators of the thermal regime for the purpose of adaptation to climate change in Russia], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 7, no. 2, pp. 140-158, doi:10.21513/2410-8758-2-140-158.

Cherenkova, Ye.A., Bardin, M.Yu., Platova, T.V., Semenov, V.A. (2020) Izmeneniye dolgoperiodnoy izmenchivosti temperatury poverkhnosti v Severnoy Atlantike i izmeneniya okeana atmosferynoy tsirkulyatsii, vyzyvayushchiye sil'nyye atmosferynye yavleniya zasukh letom na yuge Vostochno-Yevropeyskoy granitsy [Influence of long-term variability of ocean surface temperature in the North

Atlantic and changes in atmospheric circulation on the formation of severe atmospheric droughts in summer in the south of the East European Plain], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 12, pp. 5-19.

Chernogayeva, G.M., Zhuravleva, L.R., Malevanov, Yu.A., Peshkov, Yu.V., Kotlyakova, M.G., Krasil'nikova, T.A. (2021) *Obzor sostoyaniya okruzhayushchey sredy v Rossiyskoy Federatsii za 2020 god* [Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2020], Rosgidromet, Moscow, Russia, 205 p.

Shkol'nik, I.M., Yefimov, S.V. (2015) Regional'naya klimaticheskaya model' novogo pokoleniya dlya territorii severnoy Yevrazii [New Generation Regional Climate Model for the Territory of Northern Eurasia], *Trudy GGO*, issue 576, pp. 201-211.

Alekseev, G. (2021) Rise of Insolation of Low Latitudes Affects Arctic Warming, *Glob. Scient. Res. Env. Sci.*, vol. 1, issue 3, pp. 1-3, doi: 10.53902/GSRES.2021.01.000514.

Alekseev, G.V., Glok, N.I., Vyazilova, A.Ye., Kharlanenkova, N.Ye. (2020) *Climate change in the Arctic: causes and mechanisms*, IOP Conference Series, EES 606, EESE6061(002).

Alekseev, G.V., Kuzmina, S., Bobilev, L., Urazgildeeva, A., Gnatiuk, N. (2019) Impact of atmospheric heat and moisture transport on the Arctic warming, *Int. J. Climatol.*, pp. 1-11, available at: <https://doi.org/10.1002/joc.6040>.

Alekseev, G.V., Glok, N.I., Vyazilova, A.E., Kharlanenkova, N.E., Kulakov, M.Y. (2021) Influence of SST in Low Latitudes on the Arctic Warming and Sea Ice, *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, 1145, available at: <https://doi.org/10.3390/jmse9101145>.

Aleshina, M.A., Semenov, V.A., Chernokulsky, A.V. (2021) A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data, *Env. Res. Lett.*, vol. 16, L105004, doi:10.1088/1748-9326/ac1cba.

Barnston, A.G., Livezey, R.E (1987) Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns, *Mon. Wea. Rev.*, vol. 115, pp. 1083-1126.

Bauer, P., Stevens, B., Hazeleger, W. (2021) A digital twin of Earth for the green transition, *Nat. Clim. Chang*, vol. 11, pp. 80-83, available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00986-y>.

Bekryaev, R.V., Polyakov, I.V., Alexeev, V.A. (2010) Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming, *J. Climate*, vol. 23, pp. 3888-3906.

Borisenkov, E.P., Tsvetkov, A.V., Agaponov, S.V. (1983) On some characteristics of insolation changes in the past and the future, *Clim. Change*, vol. 5, pp. 237-244.

Dommenget, D. (2009) The ocean's role in continental climate variability and change, *Journal of Climate*, vol. 22(18), pp. 4939-4952, available at: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2778.1>.

Extreme events (2007) *Proceedings Hawaiian Winter Workshop University of Hawaii at Manoa, January 23-26, 2007*, in P. Muller, C. Garrett, D. Henderson (eds.), SOEST Special Publication.

Holton, J.R., Hakim, G.J. (2013) *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 5th Edition, Academic Press, Cambridge, 552 p., available at: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63394-8>.

IPCC (2021) *Summary for Policymakers, Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, in Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press.

Katz, R.W. (1999) Extreme value theory for precipitation: sensitivity analysis for climate change, *Adv. Water Resources*, vol. 23, pp. 133-139, available at: [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(99\)00017-2](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(99)00017-2).

Kislov, A., Matveeva, T. (2016) An Extreme Value Analysis of Wind Speed over the European and Siberian Parts of Arctic Region, *Atmospheric and Climate Sciences*, vol. 6, pp. 205-223, available at: <https://doi.org/10.4236/acs.2016.62018>.

Kislov, A., Matveeva, T. (2020) The Monsoon over the Barents Sea and Kara Sea, *Atmospheric and Climate Sciences*, vol. 10, pp. 339-356, available at: <https://doi.org/10.4236/acs.2020.103019>.

Kislov, A., Matveeva, T. (2021) Extreme Values of Wind Speed over the Kara Sea Based on the ERA5 Dataset, *Atmospheric and Climate Sciences*, vol. 11, pp. 98-113, doi: 10.4236/acs.2021.111007.

Koenker, R., Bassett, G. Jr. (1978) Regression Quantiles, *Econometrica*, vol. 46, no. 1, pp. 33-50.

Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A.M. et al. (2010) Precipitation downscaling under climate change. Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user, *Rev. Geophys.*, vol. 48, pp. 1-34; doi: 10.1029/2009RG000314.

Mokhov, I.I. (2021) Predictability of warm and cold winters: Assessment of El Niño effects in the North Eurasian regions, *arXiv*, available at: <https://arxiv.org/abs/2201.00050>.

Myslenkov, S., Platonov, V., Kislov, A., Silvestrova, K., Medvedev, I. (2021) Wave climate and storm activity in the Kara sea, *Water*, vol. 13, p. 648, doi: 10.3390/w13050648.

Global Change Research Needs and Opportunities for 2022-2031 (2021) National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Washington, DC: The National Academies Press, available at: <https://doi.org/10.17226/26055>.

Newman, M. (2006) *Power laws, Pareto distributions and Zipf's law*, arXiv:cond-mat/0412004v3 [cond-mat.stat-mech].

Platonov, V., Kislov, A. (2020) High-Resolution COSMO-CLM Modeling and an Assessment of Mesoscale Features Caused by Coastal Parameters at Near-Shore Arctic Zones (Kara Sea), *Atmosphere*, vol. 11, p. 1062, available at: <https://www.mdpi.com/2073-4433/11/10/1062>.

Shkolnik, I., Pavlova, T., Yefimov, S., Zhuravlev, S. (2018) Future changes in peak river flows across northern Eurasia as inferred from an ensemble of regional climate projections under the IPCC RCP8.5 scenario, *Climate Dynamics*, vol. 50, pp. 215-230, doi:10.1007/s00382-017-3600-6.

Sornette, D. (2009). Dragon-Kings, Black Swans and the Prediction of Crises, *International Journal of Terraspace Science and Engineering*, vol. 2, pp.1-18, available at: <https://doi.org/10.2139/ssrn.1596032>.

Sornette, D., Ouillon, G. (2012) Dragon-Kings: Mechanisms, Statistical Methods and Empirical Evidence, *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 205, pp.1-26, available at: <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01559-5>.

Taleb, N. (2007) Black swans and the domains of statistics, *The American Statistician*, vol. 61, no. 3, pp. 198-583, available at: <https://doi.org/10.1198/000313007X219996>.

Zolina O., Kapala A., Simmer C., Gulev S.K. (2004) Analysis of extreme precipitation over Europe from different reanalyses: a comparative assessment, *Global and Planetary Change*, vol. 44, pp. 129-161, doi:10.1016/j.gloplacha.2004.06.009.

Статья поступила в редакцию (Received): 25.01.2022

Статья доработана после рецензирования (Revised): 12.02.2022

Принята к публикации (Accepted): 14.02.2022

Для цитирования /For citation:

Ранькова, Э.Я. и др. (2022) Статистическая климатология: современные достижения и новые идеи (Научные чтения памяти Георгия Вадимовича Груза), *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 1, с. 5-50, doi:10.21513/2410-8758-2022-1-5-50.

Rankova, E.Ya. et al. (2022) Statistical climatology: modern achievements and new ideas (Scientific readings in memory of G.V. Gruza), *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 8, no. 1, pp. 5-50, doi:10.21513/2410-8758-2022-1-5-50.