

УДК 552.313.8+550.4+551.3.051:553:9

ЛИТОХИМИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ФЛЮИДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОСАДОЧНЫХ РАЗРЕЗАХ НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ КОМПЛЕКСОВ

М.А. Тугарова, В.И. Петрова

Аннотация

На примере триасового нефтегазоносного комплекса восточных островов арх. Шпицберген рассматриваются наложенные флюидные процессы, проявленные в формировании специфических карбонатных осадочных тел – микробиолитов, обладающих своеобразными морфологией, характером взаимоотношения с вмещающими породами и составом. Определены литологические и геохимические признаки, указывающие на влияние эманационных углеводородов на их генезис.

Ключевые слова: биогерм, микробиолит, эманационные углеводороды, состав и структуры пород, органическое вещество, биомаркеры, изотопы углерода и кислорода, флюидогенез.

Введение

В последние годы процессы флюидогенеза все больше привлекают внимание геологов. Изучение процессов воздействия флюидов на осадочные системы приобретает особое значение при анализе эволюции осадочных разрезов нефтегазоносных комплексов, что связано с решением широкого спектра теоретических и поисково-разведочных задач.

В осадочных системах нефтегазоносных бассейнов отчетливо проявляется углеводородная специализация процесса, в ряде случаев эманационный подток углеводородов (УВ) провоцируется магматической активизацией.

Представления о диффузионно-фильтрационном массопереносе углеводородных газов и низкомолекулярных жидких углеводородов давно и успешно развиваются в области геохимических методов поисков месторождений нефти и газа. Известно, что миграция УВ приводит к гетерогенным геохимическим процессам в породах надпродуктивных отложений [1]. Выходы газов в поверхностных горизонтах могут приводить к возникновению специфических условий в зоне осадкообразования, вызывающих появление локальных осадочных тел биохимического происхождения. Для современных обстановок наличие парагенетических связей биохемогенных пород и эманационных процессов подтверждается прямыми признаками миграции УВ.

Очевидно, что в древних осадочных разрезах невозможно получить прямые признаки дегазации былых эпох, но можно предположить, что палеоэкологическая позиция карбонатных тел, их морфология, вещественно-структурные признаки будут схожи с аналогичными современными образованиями.

При изучении нефтегазоносных комплексов идентификация палеосипов представляет особый интерес, отражая сложное развитие седиментационно-динамических систем и указывая на вероятные пути миграции УВ-флюидов.

Для уверенной диагностики следов миграции УВ в древних толщах требуется выработка ее критериев. К первой группе критериев следует отнести литолого-стратиграфические признаки – локализация тел в разрезе, их седиментационное и фациально-генетическое взаимоотношение с вмещающими породами, морфология. Это те признаки, которые в полевых условиях заставляют предположить не совсем стандартное формирование отдельных осадочных тел. Вторая группа признаков – вещественно-структурные, нацеленные на выявление особенностей состава пород, прежде всего наличия следов микробиальной активности, которая должна сопровождать эманационные процессы. Третья – изучение особенностей состава рассеянного органического вещества (РОВ) от валового уровня до индивидуальных соединений – биомаркеров. И, наконец, изучение изотопного состава углерода и кислорода для установления возможного источника вещества карбонатных фаз.

Основные методические приемы изучения наложенных процессов углеводородной флюидизации показаны на примере конкреционных образований осадочных разрезов нефтегазоносного комплекса триаса восточных островов арх. Шпицберген, где в терригенных породах были обнаружены карбонатные тела, предположительно сформированные под воздействием углеводородных эманаций. Они характеризуются специфическими морфологическими признаками и особенностями локализации в разрезе. Карбонатные образования имеют размеры до 5 м в диаметре при мощности до 1 м и залегают в терригенных вмещающих породах. Вещественно-структурные признаки пород проявляют черты, характерные для карбонатов бактериальной природы – микробиолитов. Данные изотопного анализа углерода показали резкое уменьшение $\delta^{13}\text{C}$ в этих карбонатах по сравнению с вмещающими породами, а изотопия кислорода указывает на весьма вероятную вторичную гидротермальную активность при их формировании. Эманационный фактор воздействия на рост карбонатов подтверждается и данными органической геохимии.

1. Фактический материал и методы исследований

1.1. Геологическая позиция объектов. Настоящая работа основана на фактическом материале, полученном в течение полевых сезонов 2007–2009 гг. в восточной части арх. Шпицберген (рис. 1). При стратиграфической характеристике разрезов триаса использована норвежская стратиграфическая номенклатура [2], по которой в восточной части арх. Шпицберген (Свальбард) отложения нижнего триаса в объеме индского и оленекского ярусов отнесены к свите викингхойя (Vikinghøgda Fm.), среднего триаса, анзийского и ладинского ярусов – к свите ботнехейя (Botneheia Fm.), верхнетриасовые, карнийского – к свите чермакфьелле (Tschermakfjellet Fm.) и норийского ярусов – к свите де геердален (De Geerdalen Fm.).

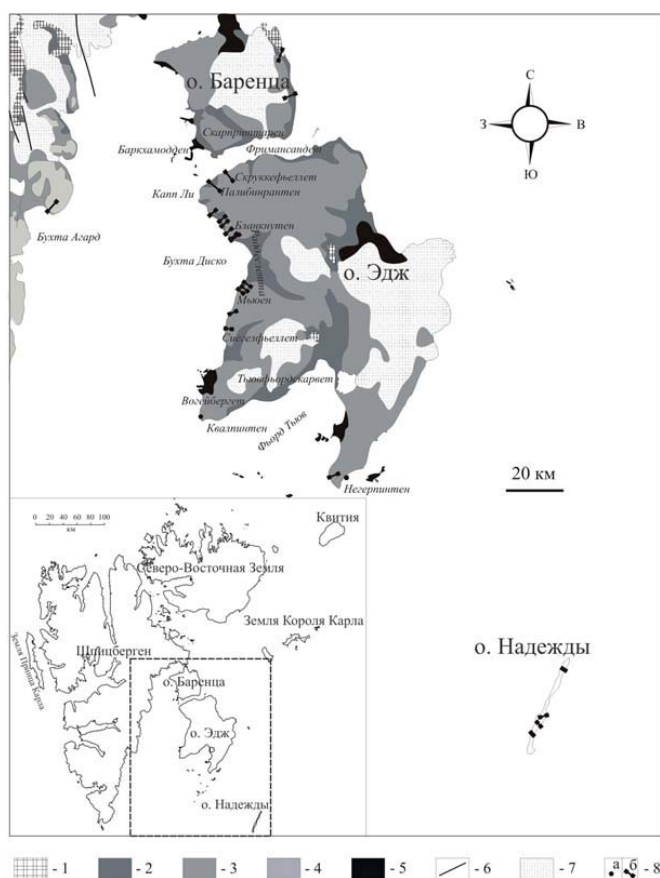


Рис. 1. Схематическая геологическая карта района работ и изученные разрезы. Условные обозначения: 1 – серии Темпелфьорден и Гипсдален (верхний палеозой); 2 – серия Сассендален (нижний – средний триас); 3 – серия Капп Тоскана (верхний триас – юра); 4 – серия Адвентдален (юра – мел); 5 – свита Диабазоддед (мезозой); 6 – разрывные нарушения; 7 – снежный покров; пункты посещения: 8а – точки наблюдения, 8б – разрезы

Лито-стратиграфическая характеристика разрезов отражена на колонках, построенных для четырех наиболее полных разрезов о. Эдж (рис. 2).

Породы свиты викингхойя представлены преимущественно темно-серыми плотными аргиллитами, реже листоватыми, с прослоями более светлых известковистых алевроитовых аргиллитов и алевролитов с тонкой горизонтальной слоистостью.

Породы свиты ботнехейя – это черные и темно-серые битуминозные аргиллиты с отдельными прослоями, в разной степени обогащенными алевроитовым материалом, и линзами карбонатизированных пород. Отличительной особенностью состава пород свиты является в разной степени проявленная фосфатность. Породы свиты содержат $C_{орг}$ до 12%, степень преобразованности органического вещества (ОВ) характеризует их как прошедшие «нефтяное окно» и заставляет рассматривать их как основной источник мезозойской нефти в регионе.

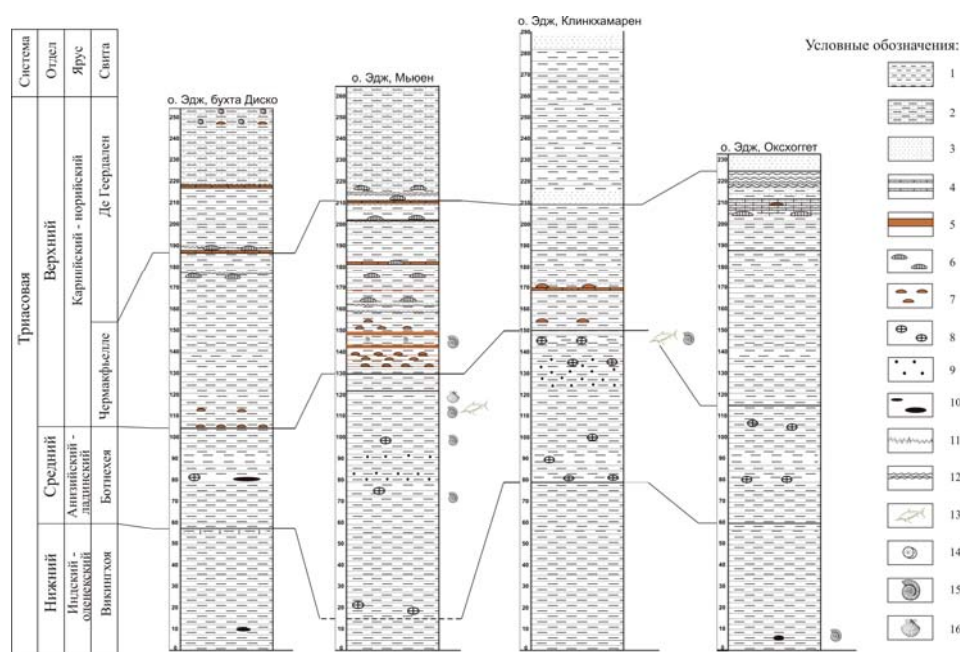


Рис. 2. Лито-стратиграфические колонки по изученным разрезам о. Эдж: Условные обозначения: 1 – аргиллиты, 2 – алевролиты, 3 – песчаники, 4 – песчаники карбонатизированные, 5 – сидеритизация, 6 – мегаконкреции (биогермы), 7 – сидеритовые конкреции, 8 – конкреции-септарии, 9 – карбонатно-фосфатные, фосфатные конкреции, 10 – уплощенно-овальные глинисто-карбонатные и карбонатные конкреции, 11 – цианобактериальные маты с текстурой конус-в-конусе, 12 – волновая слоистость, знаки ряби; *органические остатки*: 13 – позвоночные, 14 – минерализованная древесина, 15 – головные моллюски (аммоноидеи), 16 – двустворчатые моллюски (*Daonella*)

Породы формации чермакфьелле представлены аргиллитами, песчанистыми аргиллитами, отдельными прослоями терригенно-карбонатного и карбонатного состава. К верхам триаса (свита де геердален) существенно возрастает роль песчаных пород, а преобладающим типом разреза является ритмичное переслаивание аргиллитов, глинисто-песчаных алевролитов и песчаников.

Детальное послойное опробование разрезов и предварительный петрографический анализ выявили практически повсеместное присутствие карбонатной фазы в породах триасового разреза. В верхах формаций среднего и особенно верхнего триаса обращают на себя внимание карбонатизированные поверхности и приуроченные к ним локальные карбонатные тела (рис. 2). Их морфология, характер взаимоотношения с вмещающими породами, макроскопические вещественно-структурные признаки заставили предположить их возможный генезис под воздействием эманационных флюидов и постараться выделить литогеохимические критерии, которые бы подтверждали или опровергали полевые предположения.

1.2. Аналитические методы исследований. Аналитический комплекс был нацелен на всестороннее изучение вещественно-структурных особенностей пород и включал в себя следующие виды исследований: петрографический анализ шлифов, электронно-микроскопический и микрозондовый анализ, изучение

органомацералов в выделенных препаратах, битуминологический анализ с определением биомаркеров исходного органического вещества, изотопный анализ углерода и кислорода.

Петрографический анализ выполнялся на поляризационном микроскопе Leica DMP.

Детальное изучение структур и минерального состава проводилось методами электронной микроскопии в «Ресурсном центре микроскопии и микроанализа» СПбГУ под руководством А.Р. Нестерова. Исследования выполнялись на растровом электронном микроскопе – микроанализаторе SEM-501B (Philips) и системе с сфокусированным и ионным зондами QUANTA 200-3D (FEI). Химический состав минеральных фаз определялся с помощью рентгено-спектрального анализатора EDAX 9100 (EDAX, США).

Битуминологические исследования выполнялись в лаборатории органической геохимии ВНИИОкеангеологии по методике, аккредитованной Госстандартом России (№ РОСС RU.0001.512785 от 18 июля 2001 г.). Аналитическая процедура изучения РОВ включала: определение в породе нерастворимого остатка и содержания $C_{орг}$, извлечение хлороформного ($A_{хл}$) и спиртобензольного ($A_{сп-б}$) битумоидов, гуминовых кислот (ГК), определение группового состава $A_{хл}$ и углеводов.

Фракции насыщенных и ароматических УВ выделялись хроматографически и исследовались методом ГХ-МС на комплексе Hewlett Packard 5973/6850 с квадрупольным масс-детектором и программным пакетом обработки аналитической информации. Анализ углеводородных биомаркеров (*n*-алканы, изопреноиды, цикланы, арены (полиароматические УВ)) проводился методом ГХ-МС на комплексе Hewlett Packard 6850/5973 с квадрупольным масс-детектором и программным комплексом обработки аналитической информации.

Определение изотопного состава углерода и кислорода проводилось в центре изотопных исследований Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ЦИИ ВСЕГЕИ) под руководством доктора геол.-мин. наук Э.М. Прасолова. Было исследовано более 50 образцов вмещающих карбонатизированных пород и конкреций разных морфологических типов. Анализ осуществлялся по методике IRM-MS с помощью масс-спектрометра DELTA plus XL, снабженного препаративной приставкой GasBench (аппаратура производства фирмы ThermoFinnigan). Ошибка измерений (1σ) находилась в пределах 0.1–0.2‰ для углерода и 0.1–0.3‰ для кислорода.

2. Результаты исследований

2.1. Морфология. По морфологическим признакам в разрезе триаса восточных островов арх. Шпицберген были выделены три типа карбонатных тел, сформированных, предположительно, под воздействием разгрузки флюидов.

Первый тип – карбонатные тела (мегаконкреции) с плоско-выгнутой нижней поверхностью и выпукло-вогнутой верхней (рис. 3). Внутри этой карбонатной формы обнаружены единичные раковины двустворок, слепки аммонойдей, основная же масса верхней части конкреции представляет собой достаточно однородную черную микрокристаллическую карбонатную массу. Внутренняя структура этого карбонатного тела не определяет его внешнюю морфологию,

что заставляет предположить наличие каких-то других внешних факторов, обусловивших подобное строение верхней поверхности конкреции (например, выделение газов из центральной части карбонатной постройки).

Второй тип предполагаемых флюидално-бактериальных образований – карбонатные «холмы», приуроченные к карбонатизированным поверхностям внутриформационных перерывов (рис. 4, 5). Карбонатные «холмы» идентифицированы при полевых исследованиях как породы биохимического происхождения на основании их морфологии и характера взаимоотношения с вмещающими толщами. Постройки этого типа локальны, но встречаются достаточно часто в терригенной толще верхнего триаса. На о. Эдж (верхний триас, карний) они были зафиксированы на высотах 159, 162, 182 и 210 м над уровнем моря.

Размеры «холмов» достигают 1.5–4.0 м по длинной оси. Их мощность варьирует от 0.1–0.3 до 1.5 м. Характерным признаком построек верхнего триаса являются корки обрастания с текстурой конус-в-конусе. Иногда слои с этой текстурой повторяются в теле карбонатной постройки, чередуясь с карбонатизированными терригенными слоями. Особенностью строения слоев с текстурой конус-в-конусе, крустифицирующих постройки, является разнонаправленная, часто сноповидно-радиальная ориентация «конусов», что является нетипичным для текстур, сформированных как результат перекристаллизации под давлением, и заставляет предположить иную, бактериально-водородную природу этих образований.

Строение отдельных «холмов» несколько варьирует. На о. Эдж (Дискобухта) на высоте 187 м над уровнем моря описано тело биогерма, выделяющегося на фоне карбонатизированной поверхности (рис. 4). Его диаметр составляет до 2.5 м, а общая вскрытая мощность до основания – 0.6 м. Подошва купола ровная, кровля полого-куполовидная. По поверхности куполов наблюдается слой с текстурой конус-в-конусе (рис. 3).

Другие «холмы», изученные на о. Эдж, имеют более сложное строение. Так, карбонатная постройка в разрезе Мьюен (рис. 5) характеризуется следующей последовательностью слоев: 0.2 м – карбонатная порода с текстурой конус-в-конусе, слой имеет резкую ровную границу с нижележащими аргиллитами, плавно переходит в следующий слой карбонатной породы с субгоризонтальной слоистостью, мощностью 0.07–0.08 м. Выше еще один слой с текстурой конус-в-конусе, мощностью 0.2 м, который переходит в карбонатный песчаник, красный на выветрелой поверхности, мощностью 0.2 м и затем последовательность слоев еще раз повторяется. По флангам породы плавно выклиниваются в толще переслаивания аргиллитов и карбонатных песчаников. Характер залегания и строение этих образований свидетельствуют об их седиментационной природе.

К третьему типу флюидално-бактериальных образований отнесены сами карбонатизированные поверхности, которые зачастую имеют очень специфические текстурно-структурные особенности. Из наиболее интересных стоит отметить поверхности с регулярным расположением конусов (рис. 6).

2.2. Вещественно-структурные признаки пород. В изученных карбонатных постройках выделено несколько типичных видов структур [3]. К первому относятся структуры, макроскопически однородные, микритовые. Такие структуры, в частности, присущи строматолитам свиты ботнехейя (рис. 4), основная



Рис. 3. Карбонатное тело в пачке бланкнuten, свита ботнехейя, средний триас; о. Эдж



Рис. 4. Биогерм с корковой крустификацией конус-в-конусе, свита чермакфьелле, верхний триас; о. Эдж



Рис. 5. Биогерм многослойного строения, свита чермакфьелле, верхний триас; о. Эдж

масса которых представлена черным плотным микритовым карбонатным веществом. На петрографическом уровне фиксируется закономерное слоистое строение, обусловленное чередованием карбонатных и тонких битуминозно-глинистых слойков (рис. 7).

Электронно-микроскопическое изучение показало структурную неоднородность карбонатных слойков, наблюдаемых в поляризационном микроскопе (рис. 8). Порода состоит из известковых микрослойков микронной толщины, чередующихся с пленками алюмосиликатов – гидрослюды. Структура осложнена



Рис. 6. Карбонатизированная поверхность на высоте 162 м над уровнем моря, свита чермакфельле, верхний триас; о. Эдж

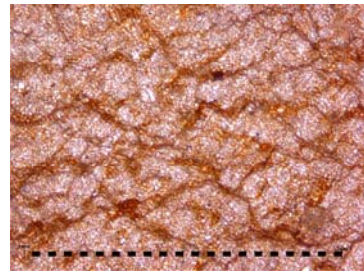


Рис. 7. Фотография шлифа породы из микритового строматолита, изображенного на рис. 4, ник. X

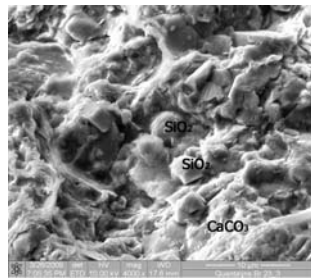


Рис. 8. Фотографии электронно-микроскопических изображений скола микритового строматолита (рис. 4), свита ботнехейя, средний триас

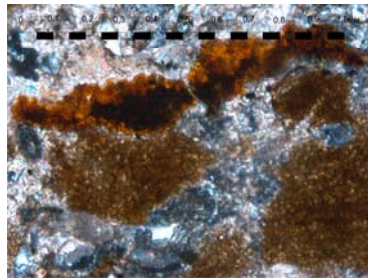


Рис. 9. Фотографии шлифа породы карбонатизированной поверхности; ник. X

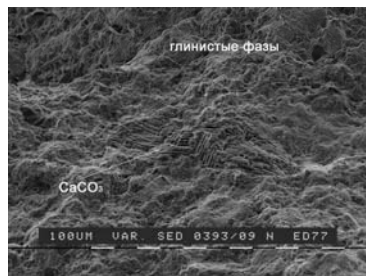


Рис. 10. Фотография электронно-микроскопического изображения скола породы карбонатизированной поверхности, свита чермакфельле, верхний триас; о. Эдж

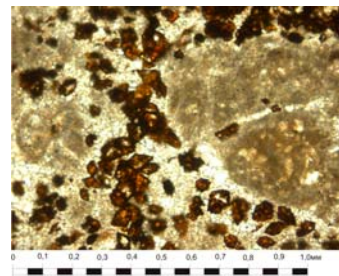


Рис. 11. Фотография шлифа породы из массивной части строматолита, ник. II

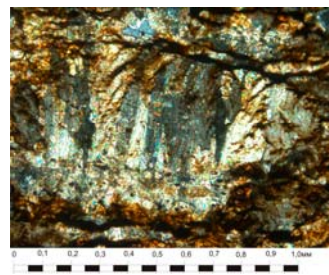


Рис. 12. Фотография увеличенного фрагмента шлифа породы из массивной части строматолита с участком перекристаллизации – микро-конус-в-конусе, ник. X

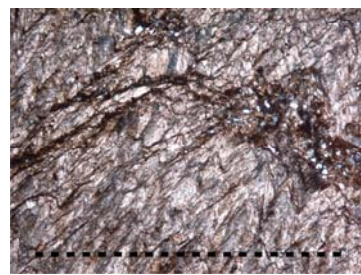


Рис. 13. Фотография шлифа битуминозной известковой породы из корки обрастания с текстурой конус-в-конусе, ник. X

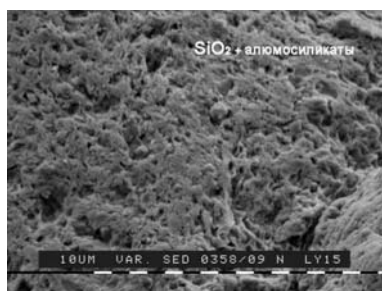


Рис. 14. Фотография электронно-микроскопических изображений скола известковой породы с текстурой конус-в-конусе

многочисленными кремнистыми включениями округлой формы, размерами в первые микроны (рис. 8). По отдельным кристаллам кальцита развиваются футляроподобные образования кремнезема. В качестве аутигенной примеси присутствуют агрегаты марказита размером 3–4 мк, состоящие из отдельных глобулей в доли мк. Подобные структурные компоненты как результат жизнедеятельности водорослево-бактериальных биоценозов, формирующих строматолиты, были описаны еще в работах известных русских альгологов А.А. Еленкина и Н.Н. Воронихина [4, 5].

Строматолиты верхнего триаса приурочены к карбонатизированным поверхностям, которые слагаются породами известково-терригенного состава. Петрографически породы характеризуются как песчано-алеврито-глинистые известняки с водорослевым детритом (рис. 9). Карбонатные фазы представлены в виде микритовых фрагментов (водорослевые остатки) размером до 0.5 мм и микрит-спаритовым цементом.

Фрагмент образца, изученный под электронным микроскопом, показал высокое содержание глинистых фаз в составе породы (рис. 10) и отдельные отчетливые фрагменты известкового состава, по-видимому, растительного происхождения.

Строматолиты второго типа (рис. 4, 5) характеризуются наибольшим разнообразием микроструктур и состава. Массивные части биогермов обычно представлены терригенно-карбонатными породами. Микротекстура породы подчеркнута тонкими битуминизированными глинистыми слоями. Содержание песчано-алевритовой фракции, в основном кварцевого состава, может достигать до 10–15%. Основная часть породы – известковые фрагменты с микритовой упорядоченной структурой. В строении микритовых обломков известкового состава наблюдается большое количество буроватых округлых или несколько сплюснутых с боков «зерен» (рис. 11). Обычно они образуют субпараллельные цепочки. Размер этих компонентов составляет сотые доли миллиметров. При растворении пород эти «зерна» в большом количестве выделялись в органические фракции.

Подобные образования были описаны К.Б. Корде как клетки сине-зеленых водорослей *Suaephysae* [6]. По ее описанию бурые тельца, имеющие те же размеры, что и указанные выше, размещаются одно над другим в пределах известковой нити и слагают ее основу. При растворении скрепляющего их кальцита расположение этих образований нарушается. К.Б. Корде отмечалось, что известковые нити могут располагаться радиально, как у современных *Rivularia heamatites* Ag., или кустисто, аналогично современной *Zonotrichia heeriana* Naeg.

В шлифах пород, содержащих микритовые карбонатные комки с нитевидными образованиями, включающие бурые тельца, были отмечены и многочисленные участки раскристаллизации конусовидной формы, в которые плавно переходили микритовые фрагменты (рис. 12). Эти участки на микроуровне повторяли макроскопические текстуры конус-в-конусе.

Макроскопически массивные части биогермов плавно переходят в корки обрастания с текстурой конус-в-конусе. В шлифах наблюдаются отчетливые зоны роста расщепленных кристаллов кальцита, перемежающихся с тонкими пленками глинистых минералов, преимущественно гидрослюды (рис. 13). Эти зоны роста с микротекстурой конус-в-конусе либо развиваются от сферолитов, сложенных карбонатным микритом с битумами, либо имеют в качестве основания, по которому начинает развиваться рост кристаллов, тонкие слойки-линзы, сложенные тонкокристаллическим кальцитом с примесью битумов. Вдоль этих слойков часто развивается микротрещиноватость, иногда микротрещины заполнены желтым битумом.

Электронно-микроскопические изображения породы отражают сложное микроветвящееся строение поверхностей микрослойков. Переплетающиеся ветвеобразные известковые нити покрыты тонкой пленкой глинистых минералов (преимущественно иллитом) и в них фиксируются отдельные сферические образования кремнистого состава (рис. 14). «Ветвящиеся» поверхности, наслаивающиеся друг на друга, формируют текстуру «конусов».

Таким образом, при детальном вещественно-структурном изучении карбонатных объектов фиксируются многочисленные признаки, присущие породам бактериального генезиса.

Все описанные карбонатные тела характеризуются очень чистым известковым составом, концентрации кальция в них достигают 48.9%, что косвенно является еще одним свидетельством их биогенной природы.

2.3. Рассеянное органическое вещество и биомаркеры. Основные характеристики РОВ для карбонатных тел разных типов приведены в табл. 1 и 2.

Биогермы I типа характеризуются высокими значениями $S_{орг}$, $A_{хл}$ и коэффициента битуминозности β ($\beta = (A_{хл} / ОВ) \cdot 100$), отражающего наличие миграционных УВ в составе РОВ [1]. В составе $A_{хл}$ преобладает масляная фракция и отмечается максимальное содержание УВ в породе с преобладанием метано-нафтеновых структур.

Содержание ОВ в биогермах II типа также несколько повышенное, а количество $A_{хл}$ и коэффициент битуминозности не превышают кларковые значения. В них фиксируется минимальное из всех изученных проб содержание масляной фракции $A_{хл}$, но при этом содержание метано-нафтеновых УВ высокое.

Для образцов их карбонатизированных поверхностей (III тип) $S_{орг}$, $A_{хл}$ и значения коэффициента битуминозности β находятся на уровне кларковых при высоких содержаниях масляной фракции и метано-нафтеновых УВ.

Изучение УВ молекулярных маркеров (метано-нафтеновой и ароматической фракций битумоидов) проводилось для выявления особенностей генезиса и уровня преобразования РОВ.

Табл. 1

Геохимическая характеристика рассеянного органического вещества

Тип	Возраст	Содержание в породе, %							
		Н.О.	$C_{\text{карб}}$	$C_{\text{орг}}$	ОВ	β	$A_{\text{хл}}$	$A_{\text{сп-б}}$	ГК
I	T_2	19.7	9.63	1.46	1.90	14.9	0.284	0.055	0.00
I	T_2	18.1	9.82	0.40	0.52	13.7	0.071	0.014	0.00
II	T_{3k}	33.2	8.01	0.50	0.65	4.6	0.030	0.014	0.00
II	T_{3k}	32.7	8.07	1.06	1.38	2.2	0.031	0.031	0.00
III	T_{3k}	37.9	7.45	0.76	0.99	2.1	0.021	0.009	0.00
III	T_{3n}	37.3	7.52	0.21	0.27	5.9	0.016	0.007	0.00
<i>кларк</i>				0.20		5–10	0.03		

Табл. 2

Битуминологическая характеристика РОВ

Тип	Возраст	Состав $A_{\text{хл}}$, %			% УВ		Состав УВ, %	
		масла	смолы	асфальтены	в породе	в ОВ	Me-Nf	Ar
I	T_2	57.0	37.6	5.4	0.162	8.53	71.1	28.9
I	T_2	84.4	15.3	0.3	0.060	11.52	81.9	18.1
II	T_{3k}	32.8	59.6	7.6	0.010	1.50		
II	T_{3k}	40.3	40.9	18.8	0.012	0.90	69.9	30.1
III	T_{3k}	56.6	36.4	7.0	0.012	1.19	72.9	27.1
III	T_{3n}	53.8	43.2	3.0	0.009	3.17	63.3	36.7
<i>кларк</i>		40.0			0.012	4.5–4.7		

Нормальные алканы и изопреноиды. Для I типа биогермов максимум в распределении *n*-алканов приходится на диапазон C_{17-25} с дополнительными слабо выраженными максимумами в области наиболее высокомолекулярных структур. Отличительной особенностью состава *n*-алканов для РОВ этого типа является высокое содержание *n*-алканов, отражающих наличие РОВ микробиального генезиса при существенном вкладе гидробионтного. В образце из биогерма о. Эдж (рис. 3) микробиальное РОВ является преобладающим [7].

Для II типа – «холмов» – типично бимодальное распределение *n*-алканов с преобладанием высокомолекулярных *n*-алканов (C_{21-31}) и слабо выраженными максимумами C_{25} , C_{27} , C_{29} , C_{31} характеризует смешанный сапропелево-гумусовый тип РОВ. Следует отметить, что уровень деградации гумусовой составляющей в этом образце минимален ($OEP_{27} = 1.27$).

Для одного из образцов их кристификационной корки с текстурой конус-в-конусе распределение *n*-алканов оказалось практически мономодальным с максимумом C_{17} (небольшой дополнительный максимум проявлен для C_{25}) и значительным преобладанием низкомолекулярных *n*-алканов. Этот тип распределения характерен для РОВ гидробионтного генезиса.

Для карбонатизированных поверхностей III типа распределение *n*-алканов практически мономодальное, с широким, слабовыраженным максимумом в диапазоне от C_{19} до C_{29} . Преобладание высокомолекулярных соединений ($C_{14-19}/C_{20-35} = 0.33$) свидетельствует о значительной роли гумусового материала в формировании состава РОВ. Специфика распределения *n*-алканов позволяет предположить смешанный генезис исходного ОВ с высоким содержанием бактериальной и

гумусовой составляющих (последняя прошла микробиальную деградацию глубокой степени) и, возможно, с проявлением термокаталитического уплотнения УВ-структур (переход нафтидов в нафтоиды).

Практически все изученные образцы характеризуются низкими значениями коэффициентов нечетности *n*-алканов (CPI, OEP₁₇, OEP₂₇ близки к 1), что указывает на высокий уровень преобразованности РОВ.

Соотношение Pr/Ph = 1.1–1.9 и высокие значения Ph/C₁₈ = 0.85–1.99 типичны для морских карбонатов. Исключение составляет один образец из карбонатизированной поверхности, в составе которого отмечается заметный вклад гумусового РОВ.

Преобладание изопреноидов (Pr и Ph) над линейными изомерами указывает на высокую микробиальную деградацию РОВ, наиболее ярко выраженную для карбонатных образований I и III типов (Kiso > 1.3).

Терпаны. Распределение терпановых УВ в изученных пробах несколько варьирует, отражая исходный состав РОВ. При этом для всех изученных образцов определены черты сходства. В составе терпанов отсутствуют биогопаны (ββ-изомеры), что свидетельствует о значительной степени преобразования РОВ. Это подтверждают и величины гопановых коэффициентов зрелости РОВ (Ts/Ts + Tm, 22S/22S + 22R C₃₁), приближающиеся к значениям термодинамического предела изомеризации.

Оценить долю участия бактериального ОБ в формировании состава РОВ позволяет соотношение 17α-гопанов, маркеров прокариот, и регулярных стеранов, отражающих вклад эукариот (высших растений и водорослей) (H₃₀/St₂₉). Этот показатель достаточно высокий для всех образцов, а наиболее значителен для III типа – карбонатизированной поверхности верхнего триаса.

Стераны. Данные по распределению стеранов расширяют геохимическую картину и дают дополнительную информацию о типе РОВ и степени его зрелости, которые хорошо согласуются с диагностикой типов РОВ по алканам и терпанам. Особый интерес представляет значение суммы стеранов. Известно, что высокие значения содержания цикланов могут являться следствием проявления миграционных УВ [7]. Максимальное значение суммы стеранов определено для биогерма I типа (рис. 3).

Арены. Полиароматические углеводороды в целом не могут быть отнесены к классу биомаркеров, поскольку лишь для некоторых из них (ретен, кадален, перилен, алкилхризены) были установлены биогенные предшественники. Однако, являясь неотъемлемым компонентом концентрированных и рассеянных форм нафтидов земной коры, полиарены участвуют во всей совокупности геохимических процессов отложения, накопления и преобразования РОВ. Соответственно, их состав и распределение позволяют проследить механизм и последовательность трансформаций РОВ от стадии седиментации до глубоких степеней катагенеза, включая зону нефтеобразования.

В изученных образцах распределение ПАУ отличалось исключительным своеобразием. Аномально высокое содержание (до 15000 нг/г) сочеталось с узким спектром идентифицированных соединений. Доминирующим компонентом в составе голоядерных ПАУ во всех изученных образцах является фенантрен, эта величина составляет 40–50%.

Табл. 3

Средние значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ для вмещающих пород и карбонатных тел

Возраст	Объекты	$\delta^{13}\text{C}$, ‰ PDB	$\delta^{18}\text{O}$, ‰ PDB
	Вмещающие породы	-2.9	-7.2
	Карбонатные тела	-6.7	-10.9
T ₁	Вмещающие породы	-3.9	-6.4
T ₂	Вмещающие породы	-2.9	-8.0
	Карбонатные тела I типа	-3.0	-7.1
T ₃	Вмещающие породы	-2.6	-7.0
	Карбонатные тела I, II и III типов	-6.9	-11.1
	Карбонатные тела I типа	-12.5	-7.7
	Карбонатные тела II типа – «холмы»	-6.6	-11.4
	Карбонатные тела III типа	-3.9	-11.1

Наибольший интерес с точки зрения генезиса РОВ представляет выявление нефтидогенной составляющей в составе ПАУ, в качестве которой могут быть рассмотрены метилзамещенные нафталины и фенантрены, наиболее характерные компоненты ароматической фракции нефтей. Во всех изученных образцах относительное содержание нефтидогенных ПАУ составляет более 80%, что указывает на уровень термальной зрелости РОВ, соответствующий главной зоне нефтеобразования, и/или что органическая составляющая изученных образцов является результатом вклада миграционных термokatалитических УВ.

2.4. Изотопный состав. Изотопный состав углерода и кислорода был изучен в 52 образцах из всех стратиграфических интервалов триаса, из них половина была представлена образцами из микробиолитов (табл. 3). В целом значения $\delta^{13}\text{C}$ для вмещающих пород близки к типично морским. Для карбонатных тел в разной степени, но наблюдается облегчение изотопного состава углерода, та же закономерность изменения значений прослеживается и для $\delta^{18}\text{O}$.

Максимально облегченный изотопный состав углерода определен для биогермов I типа (минимальное значение -20.2‰). Для карбонатных тел II типа наблюдается значительный разброс значений от -3.0‰ до -11.3‰. В пределах одного из «холмов» было зафиксировано облегчение изотопного состава углерода от подошвы, где он близок к соответствующему значению вмещающей породы к кровле (от -3.0‰ до -6.2‰).

Минимальное облегчение изотопного состава углерода, как и следовало ожидать, отмечено в образцах из карбонатизированных поверхностей, а в одном из них определено положительное значение $\delta^{13}\text{C}$ (0.4‰). Это единственное положительное значение $\delta^{13}\text{C}$ из всех данных, полученных для образцов триаса.

Для расчета палеотемператур по $\delta^{18}\text{O}$ использовалось уравнение фракционирования ($10^3 \cdot \ln \alpha_{\text{calc-w}} = 2.78 (10^6 T^{-2}) - 2.89$) по Фридману и О'Нейлу [8]. Расчеты приведены для разных значений $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) поровых флюидов. Вслед за К. Краевским [9–11], который при расчете палеотемператур для различных карбонатных образований мезозоя Свальбарда исходит из предпосылки, что диагенетические флюиды по изотопному составу не резко отличались от придонных вод (от -5‰ до 0‰), было принято значение -1‰. Рассчитанные температуры явно указывают на термобарические режимы, превышающие диагенез

Табл. 4

Средние значения палеотемператур для осадочных пород триаса

Возраст	Объекты	$\delta^{18}\text{O (SMOW)} = -1\text{‰}$		$\delta^{18}\text{O (SMOW)} = +2\text{‰}$	
		$t, \text{ }^\circ\text{C}$ средняя	пределы изменений $t, \text{ }^\circ\text{C}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$, средняя	пределы изменений $t, \text{ }^\circ\text{C}$
Триас	Весь	62	32–123	84	49–162
	Вмещающие породы	47	36–54	67	54–75
	Карбонатные тела	70	32–123	91	49–162
T_1	Весь	63	36–93	76	54–92
T_2	Весь	53	46–70	76	66–95
	Вмещающие породы	49	47–53	69	66–73
	Карбонатные тела	56	46–70	78	66–95
T_3	Весь	71	32–123	96	49–162
	Вмещающие породы	46	38–54	66	56–75
	Карбонатные тела	77	32–123	103	49–162

(табл. 4). Поэтому второе предположительное значение $\delta^{18}\text{O (SMOW)}$ было принято равным 2‰. Это значение было рекомендовано Э.М. Прасоловым для флюидов осадочных систем зоны умеренного катагенеза. Средние значения рассчитанных палеотемператур с разными значениями $\delta^{18}\text{O (SMOW)}$ поровых вод приведены в табл. 4. При разнице полученных значений тенденции в изменении остаются постоянными.

Обращают на себя внимания высокие значения температур кристаллизации конкреций верхнего триаса, что является весьма необычным при их явном седиментационно-диагенетическом образовании. При этом наблюдается определенная тенденция – облегчение изотопного состава углерода с ростом температуры кристаллизации. По-видимому, повышенные температуры кристаллизации карбонатов верхнего триаса можно объяснить дополнительным относительно фонового прогревом толщи, а одновременное облегчения изотопного состава углерода – процессом биохимического фракционирования.

Корреляция изотопных данных с некоторыми геохимическими характеристиками выявила следующее: значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ имеют обратную корреляцию с содержанием карбонатного углерода ($C_{\text{карб}}$) – при максимальных содержаниях $C_{\text{карб}}$ фиксируется облегченный изотопный состав кислорода и углерода. Для структур конус-в-конусе и карбонатизированных поверхностей также проявлена обратная зависимость в содержании $C_{\text{орг}}$ и $\delta^{13}\text{C}$ – при увеличении содержания ОВ облегчается углеродный состав. Корреляция изотопного состава осадочных образований с содержаниями УВ и *n*-алканов для разных морфологических типов карбонатных тел неоднозначная. Чаще всего фиксируется уменьшение содержания УВ и *n*-алканов при облегчении изотопного состава углерода и кислорода. При этом коэффициент битуминозности, отражающий роль миграционных УВ, как правило, оказывается повышенным. Подобные химические характеристики можно наиболее правдоподобно объяснить процессом образования карбонатов в условиях биохимического окисления эманационных УВ.

3. Выводы

В ходе полевых исследований осадочных разрезов триаса восточных островов арх. Шпицберген выделено три типа карбонатных тел, морфологические признаки которых и положение в разрезе заставили предположить их флюидално-бактериальный генезис. Петрографические и электронно-микроскопические исследования позволили идентифицировать в породах минерализованные микробные компоненты и ультраструктуры, указывающие на участие микробных сообществ в генезисе пород.

Органо-геохимические исследования показали, что породы триаса отличаются широким разнообразием в распределении углеводородного состава, при этом в породах, образованных под предполагаемым воздействием эманационных УВ фиксируется преимущественно бактериальный или гидробионтный тип РОВ. Углеводородные структуры отражают более высокую степень катагенетической преобразованности, чем во вмещающих породах. Для отдельных образцов установлено термokatалитическое уплотнение УВ-структур, соответствующее переходу нафтидов в нафтоиды. Отдельные признаки, например высокое содержание цикланов, позволяют предполагать участие сипинговых процессов в генезисе карбонатных образований. Высокие значения коэффициента битуминозности являются прямым указанием на наличие эманационных УВ в составе пород.

Изотопный состав в целом отличается облегчением кислорода и углерода. На основе данных по изотопному составу кислорода рассчитаны палеотемпературы формирования биогермов. Максимально высокие значения получены для образований верхнего триаса, предположительно испытавших флюидное воздействие. Данные по изотопии хорошо согласуются с органо-геохимическими данными.

Следует отметить, что каждый из отдельно взятых методов, использованных в работе, не дает однозначной интерпретации генезиса пород и только комплексирование описанных признаков позволяет достаточно уверенно диагностировать генезис флюидално-бактериальных осадочных тел.

Разработанный комплекс исследований позволяет всесторонне рассмотреть особенности состава осадочных образований, выделить вещественно-структурные, минеральные, химические, органохимические признаки и на основе их комплексирования уверенно диагностировать влияние эманационного углеводородного воздействия на осадочные толщи, сопровождавшегося увеличением теплового потока.

Наиболее сложной задачей является определение источника УВ и времени их миграции. Для описанных объектов в качестве очевидного потенциального источника УВ, под воздействием которых формировались карбонатные тела, является нефтематеринская толща среднего триаса (свита ботнехейя). По совокупности геологических, литологических и органо-геохимических данных породы среднего триаса характеризуются как материнские, реализовавшие свой материнский потенциал [2].

Учитывая то, что карбонатные тела рассматриваются нами как седиментационно-диагенетические, можно предположить, что их формирование могло происходить под воздействие УВ, формировавшихся в отложениях свиты ботнехейя, когда они находились еще на биохимической стадии – в диагенезе. Однако следует отметить, что изотопный состав углерода и кислорода весьма отличается от

того, который мог быть сформирован в результате биохимического фракционирования. Высокие рассчитанные палеотемпературы также не согласуются с этим предположением. Впрочем нельзя исключать последующие катагенетические преобразования пород.

Второй процесс появления миграционных УВ может быть объяснен, если допустить наличие син-седиментационных тектонических нарушений в позднем триасе как источника УВ термокаталитического генезиса. Подробные явления установлены для юрско-мелового времени [12–14] и не исключаются для позднего триаса. Разработка критериев для оценки времени миграции УВ и их источников в осадочных системах нефтегазоносных комплексов является одной из интересных и перспективных задач исследования флюидодинамических режимов древних эпох.

Основанием для настоящей работы послужило литолого-стратиграфическое изучение разрезов триаса восточных островов архипелага Шпицберген в рамках российско-норвежского проекта «Полевые работы на Шпицбергене и архипелаге Земля Франца-Иосифа – специализированные исследования». Авторы выражают благодарность руководителям проекта А.В. Зайончеку (ГИН РАН) и Х. Брекке (Норвежский нефтяной директорат) за организацию работ и руководство проектом.

Особую признательность хочется выразить доктору А. Мерку (Sintef Petroleum, Норвегия) за геологическое руководство полевыми работами и плодотворное обсуждение фациальных и стратиграфических аспектов изучения разрезов триаса. Авторы благодарят доктора геол.-мин. наук Э.М. Прасолова (ВСЕГЕИ) за руководство изотопными аналитическими исследованиями и консультации, а также руководителя «Ресурсного центра микроскопии и микроанализа» СПбГУ А.Р. Нестерова за помощь в проведении электронно-микроскопических исследований.

Summary

M.A. Tugarova, V.I. Petrova. Lithochemical Indicators of Fluid Processes in Sedimentary Sections of Oil-and-Gas Complexes.

On the example of the Triassic oil-and-gas-bearing complex of the eastern islands of the Spitsbergen archipelago, we consider superimposed fluid processes showing themselves in the formation of the specific sedimentary bodies – calcareous microbiolites – with a peculiar morphology, nature of relations with enclosing rocks, and composition. We also identify lithological and geochemical indicators showing the influence of migrated hydrocarbons on the genesis of microbiolites.

Key words: bioherm, calcareous microbiolite, migrated hydrocarbons, composition and structure of rocks, organic matter, biomarkers, isotopes of carbon and oxygen, fluidogenesis.

Литература

1. Справочник по геохимии нефти и газа. – СПб.: Недра, 1998. – 576 с.
2. Mørk A., Dallmann W.K., Dypvik H., Johannessen E.P., Larsen G.B., Nagy J., Nottvedt A., Olausson S., Phelina T.M., Worsley D. Mesozoic lithostratigraphy // Dallmann W.K. (ed.)

- Lithostratigraphic lexicon of Svalbard. Review and recommendations for nomenclature use. Upper Palaeozoic to Quaternary bedrock. – Tromsø: Norsk Polarinstitut, 1999. – P. 127–214.
3. *Тугарова М.А., Лунев П.И., Федяевский А.Г.* Морфология и микроструктуры строматолитов триаса восточных островов архипелага Шпицберген (Свальбард) // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. Геология, география. – 2010. – Вып. 2. – С. 37–58.
 4. *Воронихин Н.Н.* К познанию флоры и растительности водорослей пресных водоемов Крыма // Ботан. журн. СССР. – 1932. – № 3. – С. 265–319.
 5. *Еленкин А.А.* Синезеленые водоросли СССР. Общая часть. – М.-Л., 1936. – 679 с.
 6. *Корде К.Б.* Микроскопическая структура наслоений строматолитов и типы сохранности ископаемых Суапорхусеае // Докл. АН СССР. – 1950. – Т. LXXI, № 6. – С. 1109–1112.
 7. *Peters K., Walters C., Moldowan J.* The biomarker guide. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004. – 1155 p.
 8. *Friedman I., O'Neil J.R.* Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest // Fleischer M. (ed.) Data of Geochemistry. U.S. Geol. Surv. Prof., Pap. 440-KK, 6th ed. – 1977. – 12 p.
 9. *Krajewski K.P., Luks B.* Origin of “cannon-ball” concretions in the Carolinefjellet Formation (Lower Cretaceous), Spitsbergen // Polish Polar Res. – 2003. – V. 24, No 3–4. – P. 217–242.
 10. *Krajewski K.P.* Carbon and oxygen isotopic survey of diagenetic carbonate deposits in the Agardhfjellet Formation (Upper Jurassic), Spitsbergen: preliminary results // Polish Polar Res. – 2004. – V. 25, No 1. – P. 27–43.
 11. *Krajewski K.P., Wózny E.* Origin of dolomite-ankerite cement in the Bravaisberget Formation (Middle Triassic) in Spitsbergen, Svalbard // Polish Polar Res. – 2009. – V. 30, No 3. – P. 231–248.
 12. *Kelly S.R.A., Blanc E., Price S.P., Whitham A.G.* Early Cretaceous giant bivalves from seep-related limestone mounds, Wollaston Forland, Northeast Greenland // Harper E.M., Taylor J.D., Crame J. (eds.) The Evolutionary Biology of the Bivalvia: Geological Society Special Publication No 177. – London: Geol. Soc. London, 2000. – 177. – P. 227–246.
 13. *Campbell K.A., Farmer J.D., des Marais D.* Ancient hydrocarbon seeps from the Mesozoic convergent margin of California: carbonate geochemistry, fluids and palaeoenvironments // Geofluids. – 2002. – V. 2, No 2. – P. 63–94.
 14. *Haremo P., Andresen A., Dypvik H., Nagy J., Elverhøi A., Eikeland T.A., Johansen H.* Structural development along the Billefjorden Fault Zone in the area between Kjøllströmdalen and Adventdalen/Sassendalen, central Spitsbergen // Polar Res. – 1990. – V. 8, No 2 – P. 195–216.

Поступила в редакцию
28.11.11

Тугарова Марина Александровна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга», г. Санкт-Петербург.
E-mail: tugarova@mail.ru

Петрова Вера Игоревна – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга», г. Санкт-Петербург.
E-mail: petrovavi@mail.ru