

УДК 553.98:550.84

DOI 10.31087/0016-7894-2021-5-107-122

Газогеохимическое районирование донных отложений осадочных бассейнов и геоструктур внешнего шельфа Восточно-Сибирского моря и Северного Ледовитого океана

© 2021 г. | А.И. Гресов, А.В. Яцук, Н.С. Сырбу, А.К. Окулов

ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия; gresov@poi.dvo.ru; yatsuk@poi.dvo.ru; syrbu@poi.dvo.ru; okulov_ak@poi.dvo.ru

Поступила 30.03.2021 г.

Доработана 14.04.2021 г.

Принята к печати 05.07.2021 г.

Ключевые слова: донные отложения; газонасыщенность; изотопно-газогеохимические показатели; генезис газов; геологические факторы; Восточно-Сибирское море; Северный Ледовитый океан.

Аннотация: В донных отложениях осадочных бассейнов и геоструктур центральной части внешнего шельфа Восточно-Сибирского моря и Северного Ледовитого океана установлены метан и его гомологи, водород, гелий, оксид и двуоксид углерода, сероводород, аргон и азот. В процессе исследований определены газонасыщенность осадков и изотопно-геохимические показатели газов различных газоматеринских источников. Установлено, что в составе газовой фазы донных осадков доминируют эпигенетические газы подстилающих геологических образований — предполагаемых углегазоносных формаций, магматических образований, твердых битумов, конденсатно-газовых, газоконденсатных, нефтегазовых, газонефтяных, нефтяных скоплений и залежей. Определено, что газонасыщенность и газогеохимическое районирование донных отложений зависят от комплексного влияния основных газоконтролирующих факторов — геологического строения, складчатой и разрывной тектоники, нефтегазоносности, литологического состава и органической насыщенности, геокриологических, гидродинамических и других условий образования, накопления газов или их дегазации. На основе анализа полученных данных оценена информативность газогеохимического метода поиска залежей углеводородов и определена нефтегазоперспективность района исследований.

Финансирование: Газогеохимические исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-70038 «Ресурсы Арктики», в рамках гостемы № 0211-2021-0006 (121021500055-0). Морские экспедиционные работы (рейсы LV-77, LV-90) проведены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, Национального фонда естественных наук KHP NSFC-Shandong (гранты № U1606401 и № 41420104005), гранта Marine S&T Fund of Shandong Province (№ 2018SDKJ0104-3), а также проекта National Program on Global Change and Air-Sea Interaction (Project № GASI-GEORGE-04).

Для цитирования: Гресов А.И., Яцук А.В., Сырбу Н.С., Окулов А.К. Газогеохимическое районирование донных отложений осадочных бассейнов и геоструктур внешнего шельфа Восточно-Сибирского моря и Северного Ледовитого океана // Геология нефти и газа. — 2021. — № 5. — С. 107–122. DOI: 10.31087/0016-7894-2021-5-107-122.

Gas-geochemical zoning of seafloor formations of sedimentary basins and geostructures of East Siberian Sea and Arctic Ocean outer shelf

© 2021 | A.I. Gresov, A.V. Yatsuk, N.S. Syrbu, A.K. Okulov

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Vladivostok, Russia; gresov@poi.dvo.ru; yatsuk@poi.dvo.ru; syrbu@poi.dvo.ru; okulov_ak@poi.dvo.ru

Received 30.03.2021

Revised 14.04.2021

Accepted for publication 05.07.2021

Key words: seafloor formations; gas saturation; isotope and gas-geochemical indicators; gas genesis; geological factors; East Siberian Sea; Arctic Ocean.

Abstract: Methane and its homologues, hydrogen, helium, carbon monoxide and dioxide, hydrogen sulfide, argon and nitrogen are found in the seafloor formations of sedimentary basins and geostructures in the central part of the outer shelf of the East Siberian Sea and the Arctic Ocean. In the process of the research, gas saturation of sediments and isotope-geochemical indicators of gas genesis from various gas sources were determined. It is found that the gas phase of seafloor formations is mainly composed of epigenetic gases from underlying geological formations, namely: supposed coal and gas formations, igneous formations, solid bitumen, condensate and gas, gas and condensate, oil and gas, gas and oil, and oil accumulations and pools. It is determined that gas saturation and gas-geochemical zoning of seafloor formations depend on the mixed influence of the main gas-controlling factors, they are: geological structure; fold and fault tectonics; oil and gas occurrence; lithological composition and saturation with organic matter; permafrost-related, hydrodynamic and other conditions of formation; gas accumulation or draining-out of gas. Basing on the analysis of data obtained, the informative value of the gas-geochemical method for hydrocarbon exploration and petroleum potential of the study area were assessed.

GEOCHEMICAL SURVEYS

Funding: Gas-geochemical studies funded by the Russian Foundation for Basic Research grant No. 18-05-70038 "Arctic resources" within the scope of the state-defined topic No. 0211-2021-0006 (121021500055-0). Marine fieldworks (cruises LV-77 and LV-90) are funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, China National Natural Science Foundation NSFC-Shandong (grants No. U1606401 and No. 41420104005), grant of Marine S&T Fund of Shandong Province (No. 2018SDKJ0104-3), and the National Program on Global Change and Air-Sea Interaction (Project No. GASI-GEORGE-04).

For citation: Gresov A.I., Yatsuk A.V., Syrbu N.S., Okulov A.K. Gas-geochemical zoning of seafloor formations of sedimentary basins and geostructures of East Siberian Sea and Arctic Ocean outer shelf. *Geologiya nefi i gaza*. 2021;(5):107–122. DOI: 10.31087/0016-7894-2021-5-107-122. In Russ.

Введение

Район исследований расположен в центральной части внешнего шельфа Восточно-Сибирского моря и прилегающем секторе Северного Ледовитого океана, практически круглогодично покрытом ледовым покровом и эпизодически открываемом в последний период времени, что обуславливает труднодоступность проведения научных и поисково-разведочных работ. Основными методами изучения геологического строения района были аэрогеофизические, геофизические работы с ледовой базы (СП-24, СП-26, профили ГСЗ Трансарктика 89-91, Арктика 2000, 2005, 2007), сейсмические исследования МОВ-ОГТ с морских судов и ледоколов (профили 5АР, АР1401-1403, 1411, 1412, Arc-12-16 и др.) (рис. 1) и литологическое опробование донных осадков [1–3]. Первые сведения о содержании УВ-газов, изотопном составе углерода CH_4 и C_2H_6 в осадках восточной части района исследований получены при проведении профиля 5АР [4]. Наиболее полная информация о составе, генезисе, концентрациях природных газов, геологических условиях формирования газонасыщенности отложений и газогеохимических признаках нефтегазонасыщенности этого же района приведена в работах [5–7]. Изучение химического и газового состава донных осадков северо-западной части района исследований позволило авторам статьи выделить три группы химических элементов по значениям газогеохимических показателей. Результаты работ кратко изложены в работе [8].

Наряду с указанными исследованиями, установлено, что Предвосточносибирский [9], Северо-Чукотский, Новосибирский осадочные бассейны, Северная структурная терраса и другие геоструктуры района исследований [10–12] имеют геологические и структурно-геофизические признаки нефтегазонасыщенности.

Целью настоящей статьи являлось описание исследования формирования в голоценовых и плейстоценовых отложениях сингенетических и эпигенетических газов, особенностей распределения природных газов и изотопно-газогеохимических показателей донных отложений в рамках влияния на эти процессы основных геологических факторов. Прикладные задачи заключались в оценке нефтегазоперспективности района исследований и информативности газогеохимического метода поиска скоплений и залежей УВ. Актуальность исследований обусловлена слабой газогеохимической изученностью района и необходимостью интенсификации поисково-разведочных работ в арктическом секторе

Российской Федерации в соответствии с основными положениями «Стратегии развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года».

Методы исследований

Опробование донных осадков осуществлялось гидростатическими трубками в процессе экспедиционных работ на научно-исследовательском судне «Академик М.А. Лаврентьев» на 32 донных станциях 3 меридиональных профилей рейсов LV-45 (5АР — 2008 г.), LV-77 (I–I, II–II — 2016 г.) и LV-90 (станции 3, 4, 5 — 2020 г.) на глубинах моря 45–2565 м и опробования 0,45–5,25 м (см. рис. 1). В результате опробования из керна осадков отобрано 70 герметических сосудов и 178 проб газа, извлеченных на разных стадиях дегазации. Анализ состава газов донных осадков осуществлялся в лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН на хроматографах Газохром-2000 и КристалЛюкс-4000М. Методика определения состава газа осадков и их газонасыщенности соответствовала действующему нормативному руководству [14].

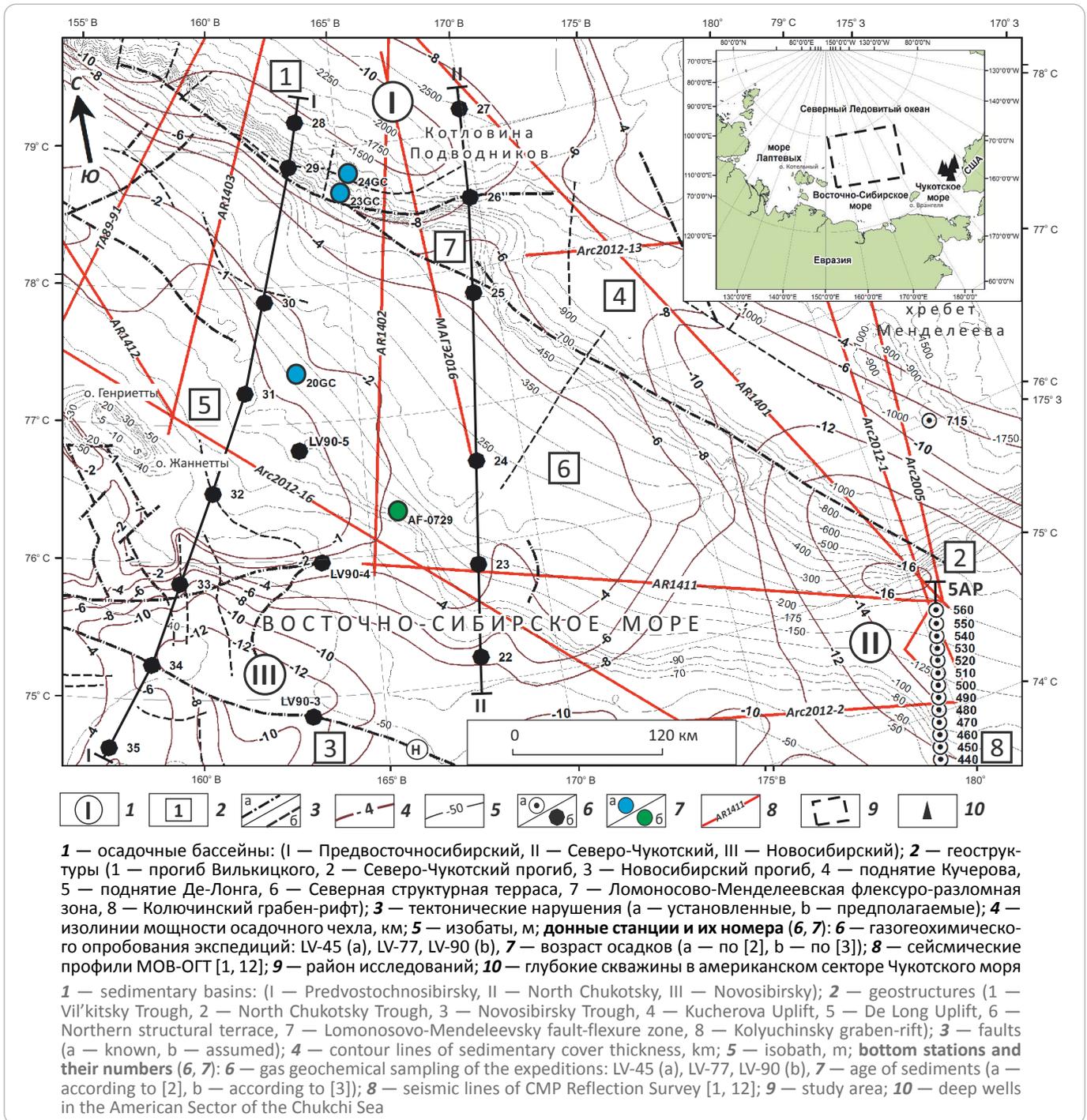
Изотопные исследования $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$, C_2H_6 и CO_2 выполнены в лабораториях стабильных изотопов ДВГИ ДВО РАН, ВСЕГЕИ и Университета Хоккайдо [4, 5, 6] на масс-спектрометрах Finnigan MAT-252, Deltaplus XL, GC Combustion III по аттестованным и оптимизированным для выполненных исследований методикам.

В процессе интерпретации результатов исследований значения молекулярной массы УВ-фракции ($M_{\text{УВ}}$), массовых концентраций УВ в долях на 1000, коэффициентов «влажности» ($K_{\text{вл}}$), преобразованности УВ-фракции ($K_{\text{пр}}$) и данные изотопных анализов использовались как индикаторы генезиса газов в различных газоматеринских источниках. Значения $K_{\text{вл}}$ и $K_{\text{пр}}$ рассчитаны по формулам: $K_{\text{вл}} = \sum \text{C}_2-\text{C}_5 / \sum \text{C}_1-\text{C}_5 \times 100\%$ [15] и $K_{\text{пр}} = (\text{C}_2 \cdot \text{C}_4) / \text{C}_3$ [16], где C_1-C_5 — массовые концентрации УВ в долях на 1000. Установлено, что коэффициент $K_{\text{пр}}$ достаточно тесно связан с возрастом нефтегазонасыщенного коллектора, т. е. его значение свидетельствует о продолжительности нахождения газа в ловушке [16, 17].

Изучение осадков ОВ осуществлялось в лаборатории аналитической химии ДВГИ ДВО РАН. Общий органический и неорганический углерод определялся методом ИК-детектирования на анализаторе ТОС-V (Shimadzu) по аттестованным и оптимизированным для выполненных исследований методикам.

Статистическая обработка результатов выполнена с использованием программного пакета

Рис. 1. Структурно-тектоническая карта [10, 13] и схема газеогехимического опробования района исследований
 Fig. 1. Structural and tectonic map [10, 13] and scheme of gas-geochemical sampling in the study area



«STATISTICA» 10.0. Оцифровка и интерпретация результатов исследований производились в программном комплексе ArcGIS® компании ESRI с помощью модуля Geostatistical Analyst по методу обратных взвешенных расстояний (IDW).

Геологическая характеристика

В связи с отсутствием глубоких скважин, информация о геологическом строении района исследова-

ний основана на материалах сейсморазведочных работ ОАО «МАГЭ» и АО «Севморгео» [12, 18], а также сейсморазведочных работ и бурения глубоких скважин в американском секторе Чукотского моря [19]. Важным источником являлись данные геологического картирования островной и океанической серий [10].

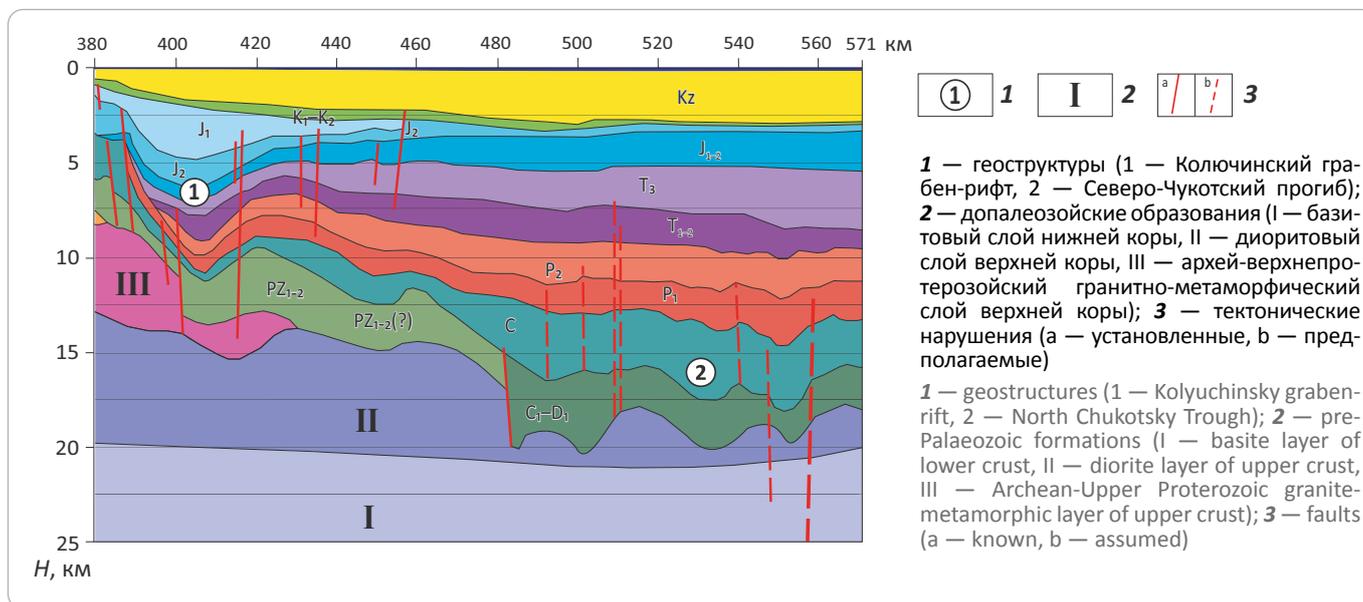
Стратиграфия. Допалеозойские образования района исследований представлены верхней мантией, базитовым слоем нижней коры и диоритовым



GEOCHEMICAL SURVEYS

Рис. 2. Схематический сейсмогеологический разрез восточной части внешнего шельфа Восточно-Сибирского моря по профилю 5AP [18]

Fig. 2. Schematic geoseismic section of the eastern part of East Siberian Sea outer shelf along 5AP Line [18]



слоем верхней коры. Глубина залегания мантии в восточной части района составляет 29–30 км, базитового и диоритового слоев — 17–20 и 13–17 км соответственно. Архей-протерозойский гранитно-метаморфический слой верхней коры в данном районе (станции 440–560, рис. 2; см. рис. 1) отсутствует [17]. В западной части района исследований архей-протерозойские породы наиболее близко подходят к поверхности на поднятии Де-Лонга и островах Генриетты и Жаннетты [10].

В вышезалегающих палеозойских, мезозойских и кайнозойских образованиях, по аналогии с американской частью Чукотского моря и Северной Аляски, выделяется пять структурно-стратиграфических сейсмокомплексов, разделенных между собой поверхностями региональных несогласий EU, PU, JU, BU, mBU: нижнеэлсмирский (девон-нижнепермский), верхнеэлсмирский (верхнепермтриас-нижнеюрский), рифтовый (верхнеюрско-барремский), нижнебрукский и верхнебрукский (апт-верхнемеловой и кайнозойский комплексы, рис. 3; см. рис. 2). Указанные комплексы идентифицируются в американской акватории Чукотского моря (см. рис. 1) по данным бурения скважин [19] и прослеживаются к западу в российском секторе Чукотского и Восточно-Сибирского морей [10, 20], что дает основание полагать синхронность развития и сходство строения этих площадей и района исследований [21].

Девон-среднепермский породный комплекс района исследований представлен известковистыми, кварц-полевошпатовыми песчаниками, известняками, алевролитами, аргиллитами, глинистыми сланцами и конгломератами общей мощностью 3–10 км;

верхнепермтриас-нижнеюрский — песчаниками, алевролитами, филлитами, глинистыми и углисто-глинистыми сланцами, конгломератами и интрузиями габбро-диабазов мощностью 2–6 км (см. рис. 2, 3).

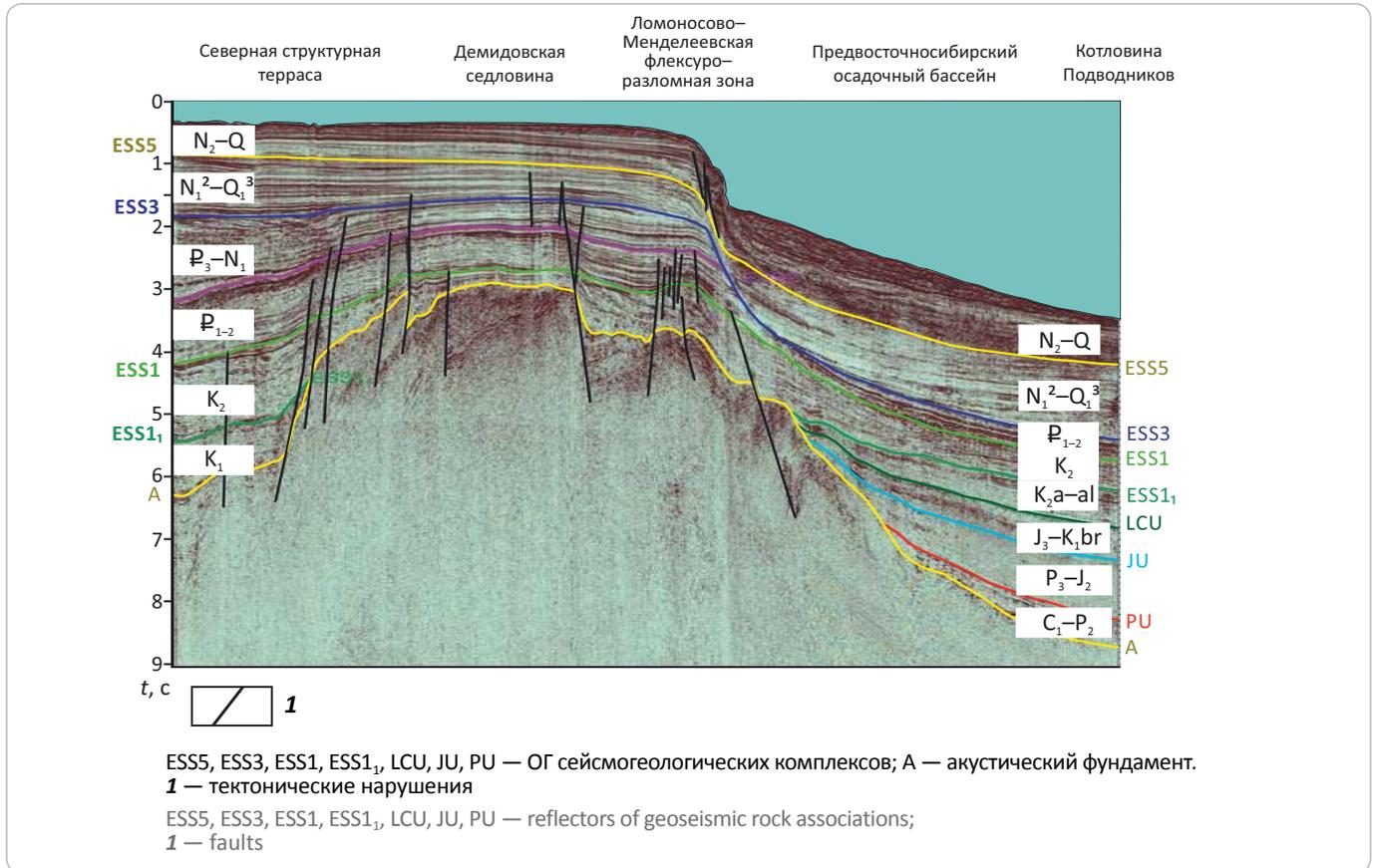
Образования *верхнеюрско-барремского* комплекса сложены алевролитами, аргиллитами, песчаниками, андезитами, дацитами, риолитами и их туфами общей мощностью до 3 км. Верхний горизонт (подкомплекс) соответствует фазе активного рифтогенеза, имеет ступенчатый характер изменения мощностей отложений, контролируемых разломами и крупными тектоническими нарушениями.

Апт-верхнемеловой комплекс представлен аргиллитами, песчаниками, алевролитами, филлитами, риолитами, дацитами, андезитами и их туфами. Общая мощность отложений комплекса в сводовой части поднятия Де-Лонга составляет 0,3 км, в зоне периклинали поднятия — 0,7–2 км, в котловине Подводников — 2,3–2,4 км [10, 12, 18, 20].

Кайнозойский комплекс представлен палеоцен-четвертичными отложениями (см. рис. 3). Образования палеогена сложены песчаниками, алевролитами, аргиллитами, конгломератами, пластами бурых углей, переслаиванием песков, глин, алевритов, в ряде случаев — базальтами и их туфами мощностью от 50 до 1800 м. В сводовой части поднятия Де-Лонга они полностью выклиниваются в результате предолигоценного размыва. Отложения неогена представлены переслаиванием песков, алевритов, глин, бурых углей, лигнитов, а также галечниками, гравийниками, песками с прослоями алевритов, лигнитов и торфов в верхней части разреза. Мощность отложений в надразломном прогибе вдоль границы

Рис. 3. Сейсмогеологический разрез МАГЭ-2016 западной части района исследований [12]

Fig. 3. Geoseismic section МАГЭ-2016 in the western part of the study area [12]



периклинали поднятия Де-Лонга и Ломоносово-Менделеевской флексуно-разломной зоны изменяется от первых сотен метров до 2 км [10, 12, 18].

Четвертичные осадки. Нижнеплейстоценовые отложения содержат разнообразные литологические разности от гравия до пелита, образованные в процессе длительного трансгрессивно-регрессивного периода в плиоцене и раннем неоплейстоцене. Позднеплейстоценовые и голоценовые осадки представлены алевритопелитами и пелитами. Содержание псаммитовой фракции не превышает 10 %, в среднем составляя на поднятии Де-Лонга и в Новосибирском бассейне 1,8–2,6 %, на остальной площади — 0,1–0,3 %. Каменный материал представлен незначительным количеством гравия и гальки. Общая мощность четвертичных осадков не превышает 200 м [2, 10, 13, 18].

Возраст позднеплейстоценовых осадков внешнего шельфа (поднятия Де-Лонга, станция 20GS, см. рис. 1) в сегменте керна 54–60 см составляет 12,04 тыс. лет, в сегменте 72–81 см — 12,52–13,21 тыс. лет, бровки шельфа (подножья Северной структурной террасы, станция АФ-07-29) в сегменте 47–52 см — 181 тыс. лет. На континентальном склоне возраст раковин в пелитовых осадках станций 23 и 24GC (глубина моря 508 и 964 м, мощность керна

406 и 405 см соответственно) составлял в интервалах керна 176–178 и 190–192 см — 37 и 46,3 тыс. лет соответственно [2, 3].

Тектоническая структура района представлена тремя прогибами — Вилькицкого, Северо-Чукотским и Новосибирским, в пределах которых сформировались два крупных окраинно-шельфовых осадочных бассейна — Предвосточносибирский и Северо-Чукотский, и один — внутришельфовый — Новосибирский. Осадочные бассейны разделены между собой Северной структурной террасой, поднятиями Де-Лонга и Кучерова (см. рис 1).

Важным структурно-тектоническим элементом, объединяющим прогибы Вилькицкого и Северо-Чукотский, является Ломоносово-Менделеевская флексуно-разломная зона. В Новосибирском прогибе аналогичным элементом является одноименная разломная зона, осложненная опережающими ее нарушениями.

Необходимо отметить, что все структурные зоны характеризуются блоковым строением земной коры и ограничены крутопадающими сбросами. Амплитуда смещения по сбросам достигает 2 км. При этом ведущим процессом формирования зон являлся рифтогенез. Начальная стадия рифтогенеза проявилась

в глубокопогруженных структурах котловины Подводников, которая постепенно разрастаясь, привела к формированию в центральной части западного сектора района исследований зон сквозных структур дробления [10]. Основанием для их выделения послужили гравиметрические данные и результаты сейсмопрофилирования МОВ-ОГТ Arc-2012-16, Arc-1402, МАГЭ-2016 и др. (см. рис. 1), где эти зоны представлены системой односторонних грабен и горстов с амплитудами смещения по сбросам до 1–2 км. Установлено, что в течение кайнозоя происходило резкое ослабление рифтогенного процесса [10, 18].

Магматические образования района исследований представлены силлами и дайками метадиоритов и метадолеритов, залегающими в туфоаргиллитах, туфогравелито-песчаниковой и базальтовой толщах островного архипелага Де-Лонга и зонах сквозных структур дробления. В последних доминируют базальты апт-альбского возраста. Помимо апт-альбских, установлены и миоценовые базальты, образующие два небольших покрова в северо-западной части Ломоносово-Менделеевской зоны [10].

Органическая насыщенность. К наиболее древним органически насыщенным литотипам островного обрамления района исследований (островов Котельный и Врангеля) относятся твердые битумы палеозой-мезозойского возраста. Содержание битумоида находится в тесном соответствии с содержанием ОВ — от долей до первых единиц процента. В групповом составе твердых битумов (антраксолитов) преобладают смолы, асфальтены и ароматические фракции [22, 23].

В породах норийского и карнийского ярусов континентального обрамления восточной части района исследований установлены углистые сланцы с содержанием $C_{орг} = 16–29\%$ и прослойки каменных углей — 85–87 %. В нижнемеловой кукевеевской свите одноименной угленосной площади содержится 8–12 пластов каменных углей стадий катагенеза $МК_3–AK_1$ мощностью 1,4–4 м. Аналогами нижнемеловых углей западной части района исследований являются угли Анжуйского угольного бассейна, в Балыктахской свите которого установлено до 9 пластов каменных углей стадий катагенеза $МК_1–МК_2$ мощностью 1,2–25 м и с содержанием $C_{орг} = 83–90\%$.

В палеогеновых и неогеновых отложениях района исследований также установлены пропластки и пласты бурого угля (стадии катагенеза $ПК_1–ПК_3$), линзы лигнитов мощностью от 0,1 до 8 м и с содержанием $C_{орг} = 60–85\%$. В нижнеплейстоценовых осадках наблюдаются пласты торфа мощностью до 1–2 м [6, 7, 10, 24].

Исследованные донные отложения Новосибирского и Северо-Чукотского бассейнов характеризуются содержаниями $C_{орг} = 0,6–1,8\%$, поднятия Де-Лонга и Северной структурной террасы — 0,6–1,2 %, Пред-

восточносибирского бассейна (котловины Подводников) — 0,1–0,4 %.

Установлено, что содержание $C_{орг}$ в осадках связано обратной корреляционной связью с глубиной моря (–0,69), что соответствует общерегиональной закономерности уменьшения в осадках содержания органического углерода в направлении шельф – пелагиаль.

Геологические условия. В процессе морских экспедиционных работ (рейсы научно-исследовательского судна «Академик М.А. Лаврентьев» — LV-45, 77, 90) установлено, что температуры донных отложений осадочных бассейнов характеризуются преимущественно отрицательными значениями (–0,4...–1,8 °С), что обусловлено развитием в районе исследований зоны многолетнемерзлых пород. Наряду с этим, в пределах исследованных бассейнов и геоструктур наблюдались участки донных осадков с положительными температурами (0,3–1 °С).

Результаты и обсуждение

Состав и генезис газов. В составе газов донных осадков установлены метан (в концентрациях 0,001–0,037 см³/кг), УВ-газы (в сумме до C_5 — 0,0001–0,0055 см³/кг), CO₂ (0,5–17,4 см³/кг), CO (0,009–0,064 см³/кг), H₂ (0,015–0,122 см³/кг), He (0,0003–0,0853 см³/кг), редко — H₂S (0,003–0,025 см³/кг). Содержания N₂ и Ar изменяются в сумме от 81 до 91,5 %.

В процессе исследований установлено, что формирование газовой фазы донных отложений подчиняется правилам аддитивности, т. е. последовательного накопления газов различного генезиса с доминированием газовой составляющей и газогеохимических показателей более газонасыщенного газоматеринского источника. Исходя из полученных значений $M_{УВ}$, массовых концентраций индивидуальных УВ, $K_{вл}$, $K_{пр}$, $\delta^{13}C-CH_4$, C₂H₆, CO₂ и данных работ [17, 25, 26], в изученных отложениях доминируют эпигенетические газы восьми предполагаемых газоматеринских источников, в том числе нефтегазовых, газонефтяных, нефтяных скоплений и залежей (табл. 1). Важно отметить, что осадочные бассейны и геоструктуры района исследований относятся к наиболее перспективным нефтегазоносным площадям Восточно-Сибирского моря [12, 27]. Исходя из существующих представлений о наличии фильтрационно-диффузионного массопереноса и миграции УВ-газов из нефтегазовых скоплений и залежей в перекрывающие их отложения, изотопно-газогеохимические показатели донных осадков являются прямыми признаками нефтегазоносности.

В процессе исследований установлено, что идентифицировать сингенетические УВ-газы в изученных осадках достаточно сложно из-за незначительных объемов их образования в условиях отрицательных температур и процессов их смешивания с миграционными газами. Существенный объем сингенети-

Табл. 1. Средние значения геохимических показателей УВ-газов донных осадков района исследований

Tab. 1. Average values of geochemical indicators of HC gas from seafloor sediments of the study area

Генетическая группа, газоматеринский источник (донные станции)	Массовые концентрации (в долях целого на 1000)					M _{УВ} , г/моль	Геохимические показатели		
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅		K _{ВН} , %	K _{пр}	δ ¹³ C-CH ₄ , ‰ [8]
1. Углегазоносные формации (450, 490, 500)	974	9	7	6	4	16,31	2,6	9	-60,1
2. Магматические образования (3)	920	37	29	14	0	16,79	8,0	18	н. о.
3. Конденсатно-газовые залежи (4, 22, 715)	892	38	24	45	1	17,16	10,8	72	-51,1
4. Твердые битумы (5, 23, 460, 470)	853	54	24	57	12	17,63	14,7	156	-48
5. Газоконденсатные залежи (440, 510, 520, 540)	818	34	26	73	49	18,20	18,2	85	-50
6. Нефтегазовые залежи (24, 27, 31, 34, 35, 480, 530, 560)	663	122	113	83	19	20,09	33,7	160	-42,3
7. Газонефтяные залежи (30, 32)	531	177	119	120	26	22,17	46,9	232	-42,8
8. Нефтяные залежи (25, 26, 28, 29, 33, 550)	482	202	113	115	88	24,04	51,8	276	-39,4

Примечание: н. о. — не определялся.

Табл. 2. Средние значения концентраций и изотопный состав газов донных отложений на участках развития предполагаемых геологических образований (газоматеринских источников)

Tab. 2. Average values of gas concentration and isotopic signature in seafloor sediments of the areas of the assumed geological formations occurrence (gas sources)

Газоматеринский источник	Концентрация газов, см ³ /кг					δ ¹³ C, ‰ [8]	
	CH ₄	ТУ	CO ₂	H ₂	H _e	C ₂ H ₆	CO ₂
Угленосные формации	0,021	0,0013	0,65	0,015	0,0024	-31	-24,8
Магматические образования	0,006	0,0002	0,81	0,018	0,0098	н. о.	н. о.
Конденсатно-газовые залежи	0,016	0,0010	1,56	0,048	0,0109	н. о.	-22,7
Твердые битумы	0,015	0,0007	3,19	0,067	0,0242	-23,1	-21,1
Газоконденсатные залежи	0,004	0,0002	3,26	н. о.	н. о.	-21	-23,1
Нефтегазовые залежи	0,013	0,0024	7,04	0,031	0,0018	-21	-20,5
Газонефтяные залежи	0,008	0,0034	3,45	0,007	0,0020	-21,5	-19,7
Нефтяные залежи	0,005	0,0024	3,50	0,015	0,0019	-18	-20,1

Примечание: н. о. — не определялся.

ческих газов, вероятно, присутствует в газовой фазе донных отложений в пределах развития предполагаемых угольных залежей (K_{вл} — 2,6 %, δ¹³C-CH₄ и C₂H₆: -60 и -31 ‰ соответственно), конденсатно-газовых и газоконденсатных залежей (δ¹³C-CH₄: -50...-51 ‰), в меньшей мере — в остальных генетических группах УВ-газов (см. табл. 1).

Исходя из полученных данных, в УВ-фракции донных осадков района исследований доминируют УВ-газы различных газоматеринских источников, образование которых связано с процессами катагенеза, в единичных случаях (магматогенные) — с областями развития магматических образований. Подтверждением миграционной природы УВ-газов в осадках являются высокие значения массовых концентраций УВ-фракции C₂-C₅, газогеохимических показателей, а также изотопного состава углерода в

CH₄ и C₂H₆ (табл. 2; см. табл. 1). Образование метана и этана биогенного и биохимического происхождения в донных осадках имеет ограниченный характер. Отрицательная корреляция концентраций метана и его гомологов с содержанием C_{орг} (R² = -0,07 и -0,36) косвенно подтверждает сделанное заключение и свидетельствует о доминировании эпигенетических УВ-газов в изученных донных отложениях. Здесь же следует отметить, что наличие прямой корреляционной связи (R² = 0,7) концентраций метана и его гомологов свидетельствует об общих условиях и источниках их образования.

Углекислый газ, с одной стороны, является продуктом окисления ОВ в донных осадках, с другой — постоянным газом подстилающих их геологических образований. Наличие прямой корреляционной связи концентраций CO₂ с содержанием C_{орг} (R² = 0,56)

GEOCHEMICAL SURVEYS

Табл. 3. Средние значения газонасыщенности и изотопного состава УВ-газов донных отложений осадочных бассейнов и геоструктур района исследований**Tab. 3.** Average values of HC gas saturation and isotopic signature in seafloor formations of sedimentary basins and geostructures of the study area

Осадочные бассейны, геоструктуры	Газонасыщенность, см ³ /кг						δ ¹³ C, ‰	
	CH ₄	УВ-газы	CO ₂	CO	H ₂	He	CH ₄	C ₂ H ₆
Северо-Чукотский	0,007	0,0006	2,99	0,015	0,025	0,0031	-49,2	-19
Колючинский грабен-рифт	0,013	0,0015	1,03	0,014	0,037	0,0032	-52,1	-31
Предвосточносибирский	0,005	0,0024	1,83	0,049	0,045	0,0025	-38,2	-18,1
Поднятие Де-Лонга	0,007	0,0015	4,43	0,036	0,057	0,0183	-41,8	-20,4
Новосибирский	0,011	0,0024	11,36	0,047	0,010	0,0046	-41,9	-20,4
Северная структурная терраса	0,023	0,0024	2,46	0,045	0,027	0,0065	-46,2	-21,9

и отрицательной (-0,53) — с глубиной опробования указывает, с одной стороны, на сингенетический характер его образования в донных отложениях, значения изотопного состава δ¹³C-CO₂ в интервале -19,7... -24,8 ‰, с другой — на эпигенетический (см. табл. 2). Данное положение связано с формированием в осадках полигенезисного состава CO₂.

Присутствие оксида углерода в донных осадках объясняется не только недоокислением ОВ кислородом в условиях развития многолетнемерзлых пород, но и его миграцией из подстилающих магматических образований, твердых битумов и угольных залежей в пределах зон сквозных таликов и тектонических нарушений [6, 7, 25].

Гелий относится к радиогенному типу миграционных газов, образовавшихся за счет радиоактивного распада на большой глубине и поступивших в донные отложения района исследований по разломам и апофизам Новосибирской и Ломоносово-Менделеевской разломных зон (см. рис. 1). Концентрации He и H₂ связаны прямой корреляционной связью ($R^2 = 0,65$), что свидетельствует о высокой вероятности их совместного образования. Можно отметить, что газовые, нефтегазовые, газонефтяные и нефтяные залежи месторождений восточной части Сибирской платформы являются гелиеносными и содержат промышленные концентрации гелия и аномальные — водорода [7, 28].

Природа водорода в осадках — также миграционная. Водород является постоянным спутником природных газов магматических образований островного и континентального обрамления Восточно-Сибирского моря, а также одним из основных газов нефтегазоносных бассейнов востока России. Концентрации водорода в газовых, нефтегазовых и нефтяных залежах Ленского, Анадырского и Верхнебуреинского бассейнов достигает 27–30 % [7, 25, 29]. Известно [30], что водород образуется на глубоких горизонтах при разложении подземных вод под воздействием α-излучения. Радиолиз ОВ пород также влияет на процессы образования CO₂, CH₄, CO, H₂ и

жидких УВ. В количественном отношении радиогенное образование H₂ — незначительное, и поступление его в верхние горизонты и донные отложения носит весьма ограниченный характер. Кроме того, несущественная его часть, вероятно, образовалась в донных отложениях района в процессе биохимических реакций [6, 7, 29]. Таким образом, в газах донных отложений района исследований доминирует водород, образование которого связано с процессами катагенеза ОВ и магматической деятельностью.

Установлено, что распределение сероводорода в донных отложениях носит «гнездовой» характер, а происхождение связано, по-видимому, с биохимическими и химическими реакциями в донных отложениях [6, 7]. Наряду с этим можно отметить, что аномальные содержания H₂S известны в нефтегазоносном бассейне Грин-Ривер (17,8–30,1 %), Западно-Канадском (7,1–52 %), Волго-Уральском (4,9–5,5 %) и других бассейнах [16].

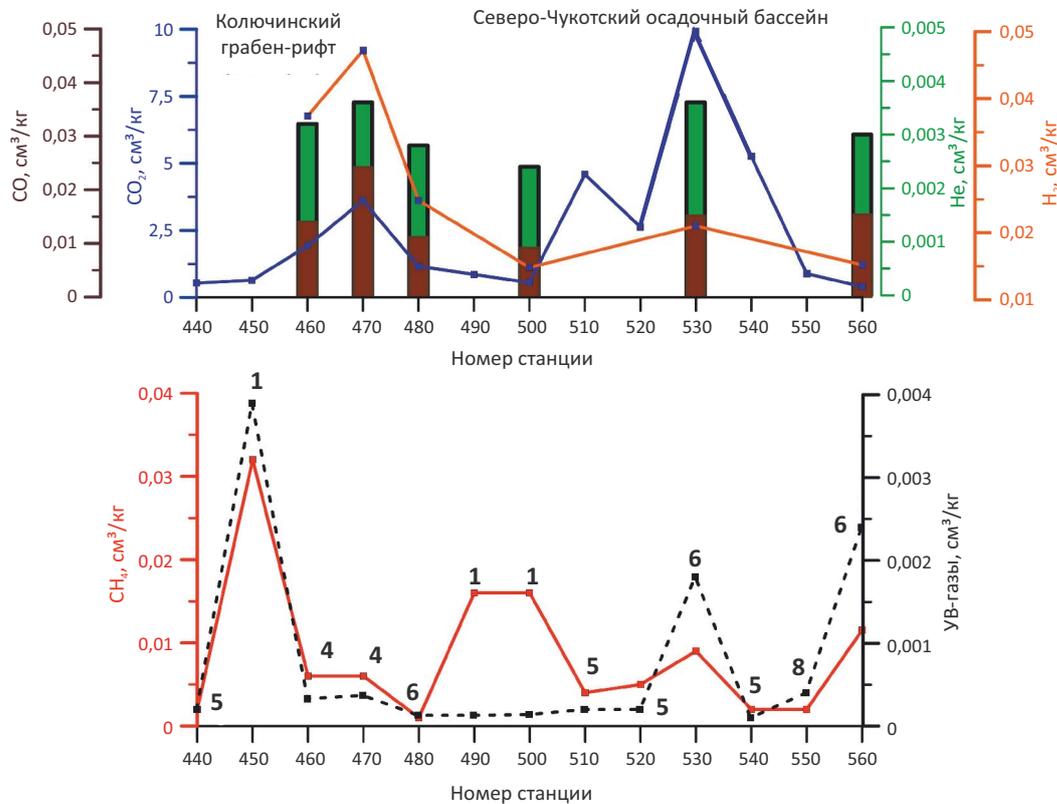
Генезис азота и аргона — атмосферный и глубинный. Содержания N₂ и Ar до 80–90 % известны в газах месторождений нефтегазоносных бассейнов Скалистых гор США, Волго-Уральского бассейна (до 70–90 %) и др. [6, 16].

Газогеохимическое районирование. Характеристика изменчивости распределения средних значений газонасыщенности донных отложений осадочных бассейнов и геоструктур района исследований приведена в табл. 3.

В процессе исследований установлено, что максимальной метанонасыщенностью донных отложений *восточной части* района исследований характеризуются площади развития предполагаемых углегазоносных формаций, минимальной — газоконденсатных залежей, промежуточной — твердых битумов, нефтегазовых и нефтяных залежей Северо-Чукотского бассейна (рис. 4).

Максимальные значения УВ-насыщенности осадков установлены на площадях развития предполагаемых угольных залежей Колючинского грабен-рифта и нефтегазовых залежей Северо-Чукот-

Рис. 4. Изменчивость распределения газонасыщенности донных отложений Северо-Чукотского осадочного бассейна по профилю 5AP
Fig. 4. Variability of gas saturation distribution in seafloor sediments of the North Chukotsky sedimentary basin along 5AP Line



Предполагаемые газоматеринские источники: **1** — угленосные формации, **4** — твердые битумы (антраксолиты), **5** — газоконденсатные, **6** — нефтегазовые, **8** — нефтяные скопления и залежи
 Anticipated gas source formations: **1** — coal-bearing formations, **4** — solid bitumen (anthraxolite), **5** — gas and condensate, **6** — oil and gas, **8** — oil accumulations and pools

ского бассейна, минимальные — газоконденсатных и угольных залежей Северо-Чукотского бассейна, промежуточные — твердых битумов и нефтяных залежей. Несоответствие концентраций УВ-газов на участках развития прогнозных угольных залежей Колючинского грабен-рифта и Северо-Чукотского осадочного бассейна обусловлено, вероятно, разными стадиями их катагенеза — МК₅–АК₁ и ПК₁–МК₃ [6, 7, 25, 29].

Максимальной газонасыщенностью CO₂ и CO характеризуются донные отложения южного крыла Северо-Чукотского бассейна и его центральной части, минимальной — северного крыла и Колючинского грабен-рифта. Промежуточные показатели доминируют на остальной площади. Аналогичные закономерности газогеохимического районирования установлены для H₂ и He (см. рис. 4).

Максимальной метанонасыщенностью донных отложений в западной части района исследований отличаются площади развития предполагаемых твердых битумов, конденсатно-газовых, нефтегазовых залежей Северной структурной террасы и Новосибирского бассейна, минимальной — газонефтяных

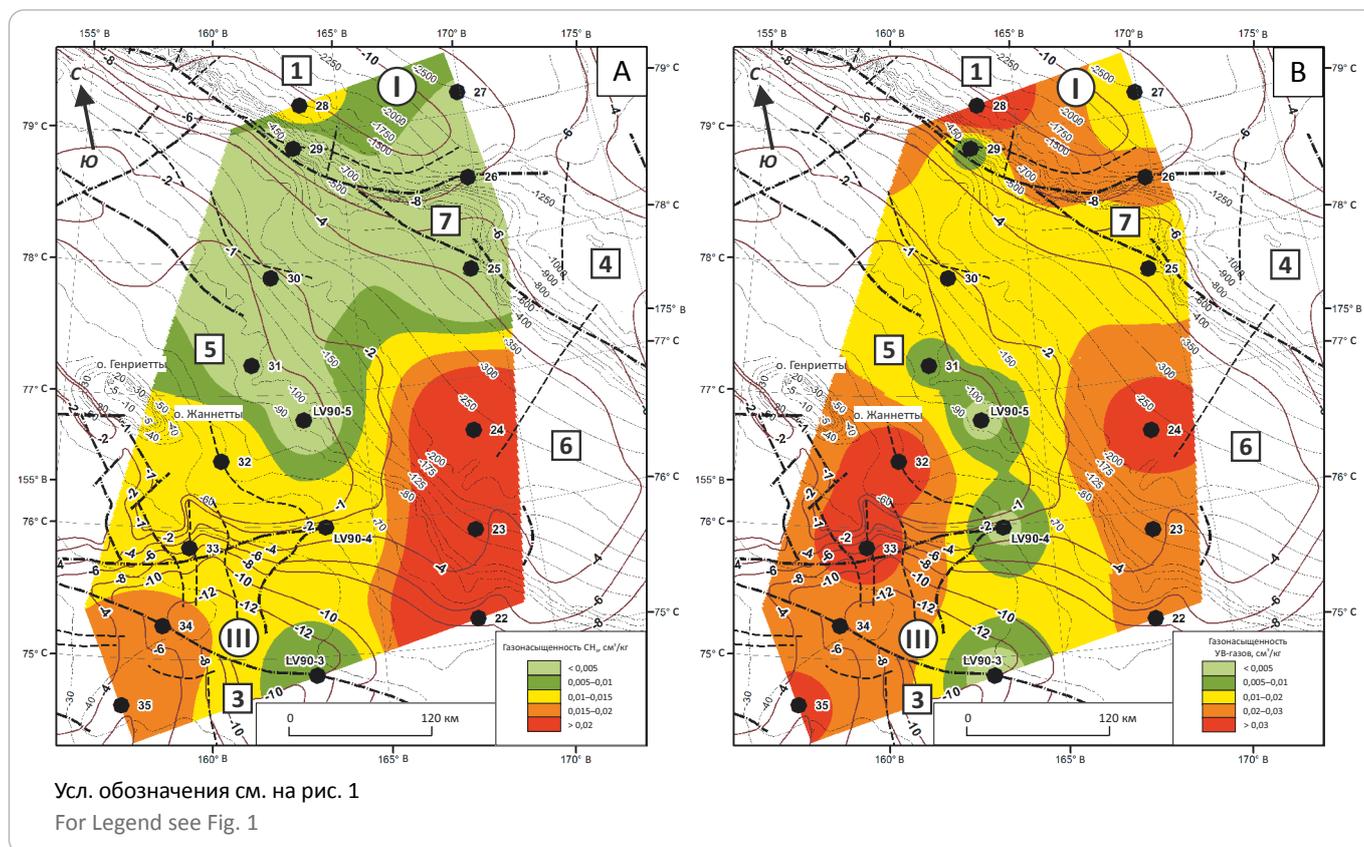
и нефтяных залежей Ломоносово-Менделеевской флексуры-разломной зоны, северного крыла поднятия Де-Лонга, южного крыла Предвосточносибирского бассейна и магматических образований Новосибирского бассейна. Промежуточные значения метанонасыщенности установлены в пределах распространения предполагаемых конденсатно-газовых залежей поднятия Де-Лонга и нефтяных залежей центральной части Предвосточносибирского осадочного бассейна (рис. 5).

Минимальная УВ-насыщенность донных отложений типична для сложнодислоцированной центральной части западного сектора района исследований (зоны сквозных структур дробления [10]) в пределах участков распространения предполагаемых твердых битумов, конденсатно-газовых залежей восточного крыла поднятия Де-Лонга и магматических образований в пределах Новосибирского разлома. Максимальные значения УВ-насыщенности осадков установлены на площадях развития прогнозных нефтяных, нефтегазовых и газонефтяных скоплений и залежей Северной структурной террасы, Пред-



GEOCHEMICAL SURVEYS

Рис. 5. Распределение концентраций метана (А) и суммы УВ-газов (В) в донных отложениях западной части района исследований
Fig. 5. Distribution of methane (A) and HC gases (B) concentrations in seafloor formations of the western part of the study area



восточносибирского и Новосибирского осадочных бассейнов. В донных осадках крыльев зон сквозных структур дробления и континентального склона наблюдаются промежуточные показатели (см. рис. 5).

Особенностью газогеохимического районирования и изменчивости распределения углекислого газа в осадках является формирование аномальных концентраций CO_2 в пределах сводовой части поднятия Де-Лонга (до $10,1 \text{ см}^3/\text{кг}$) и северо-западного крыла Новосибирского бассейна (до $17,4 \text{ см}^3/\text{кг}$) на фоне промежуточных значений на северном крыле поднятия Де-Лонга, в центральной части Северной структурной террасы, минимальных — в структурах сквозного дробления, Ломоносово-Менделеевской флексуно-разломной зоны и Предвосточносибирского осадочного бассейна (рис. 6).

Распределение оксида углерода в донных осадках, по сравнению с восточной частью района исследований (см. рис. 4), в значительной мере отличается от углекислого газа (см. рис. 6). Значения максимальных концентраций CO в донных отложениях южного крыла Северной террасы и Предвосточносибирского бассейна свидетельствуют о наличии других основных газоматеринских источников его поступления в осадки, за исключением Новосибирского бассейна, где они, по-видимому, характеризуются общими источниками образования.

В процессе проведения газогеохимического районирования установлено, что максимальной водородонасыщенностью характеризуются глубоководные осадки котловины Подводников, а также донные отложения горстов структурных зон сквозного дробления. Аналогичное распределение типично для аномальных концентраций гелия, за исключением глубоководных осадков (см. рис. 6).

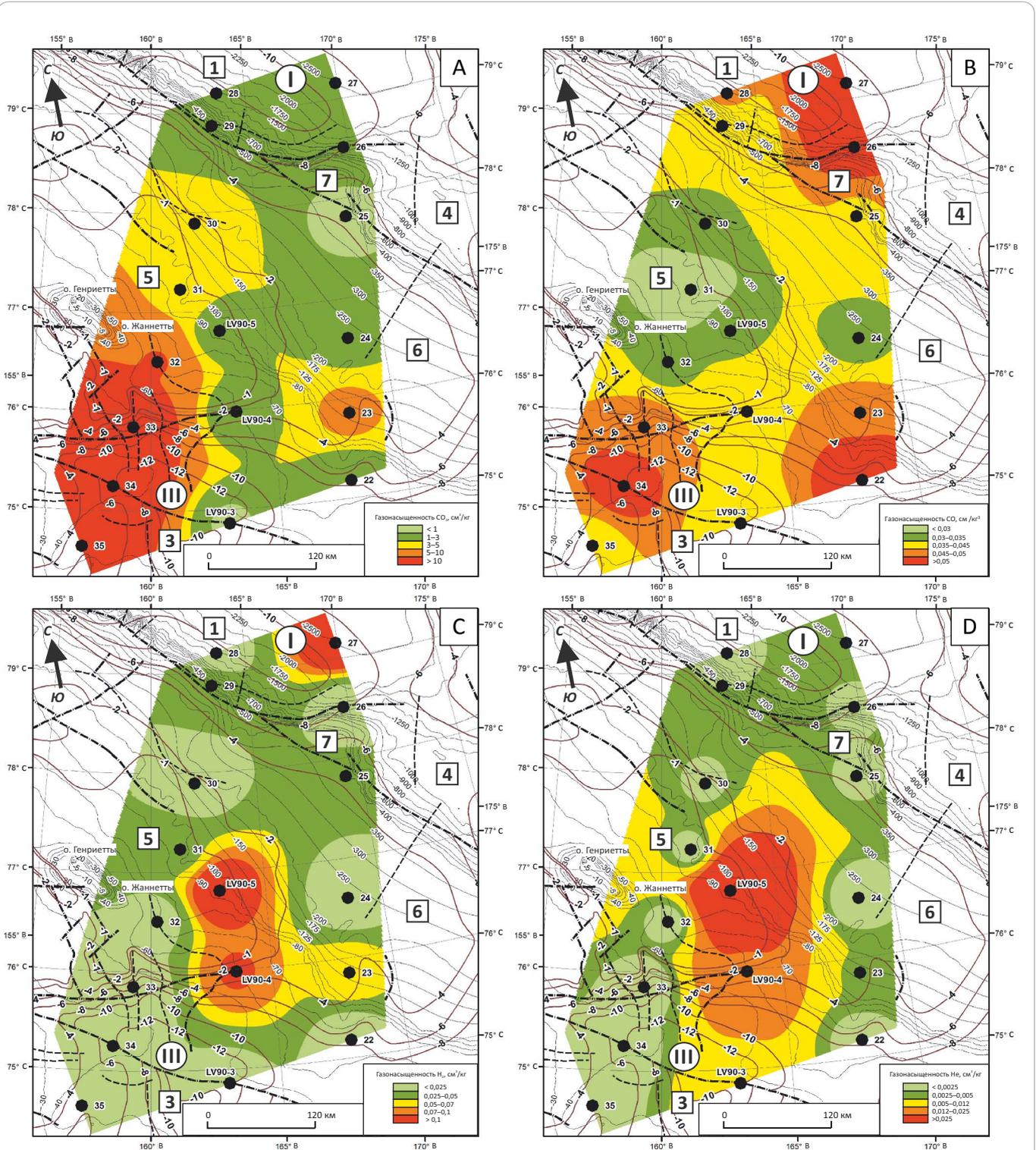
Изучение газов донных отложений в южной части хребта Менделеева проведено на отдельной станции 715 (см. рис. 1). В составе газовой фазы осадков установлены метан ($0,0012 \text{ см}^3/\text{кг}$) и его гомологи (в сумме — $0,0005 \text{ см}^3/\text{кг}$), углекислый газ ($1,56 \text{ см}^3/\text{кг}$), водород ($0,0405 \text{ см}^3/\text{кг}$) и гелий ($0,0072 \text{ см}^3/\text{кг}$). Исходя из показателей $M_{\text{УВ}} = 17,24 \text{ г/моль}$, $K_{\text{вл}} = 10,5 \%$, $K_{\text{пр}} = 50,3$ и $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4 = 49,1 \text{ ‰}$, в донных осадках доминируют УВ-газы предполагаемых конденсатно-газовых залежей.

Нефтегазоперспективность района исследований

Исходя из данных газогеохимических работ, к наиболее высокоперспективным нефтеносным прогнозным территориям западного сектора района исследований (рис. 7) относятся площади юго-восточной части Предвосточносибирского осадочного бассейна (прогиба Вилькицкого), Ломоносово-Менделеевской структурно-тектонической зоны и северо-

Рис. 6. Распределение концентраций двуоксида (А) и оксида (В) углерода, водорода (С) и гелия (D) в донных отложениях западного сектора района исследований

Fig. 6. Distribution of carbon dioxide (A) and monoxide (B), hydrogen (C) and helium (D) concentrations in seafloor formations of the western sector of the study area



Усл. обозначения см. на рис. 1

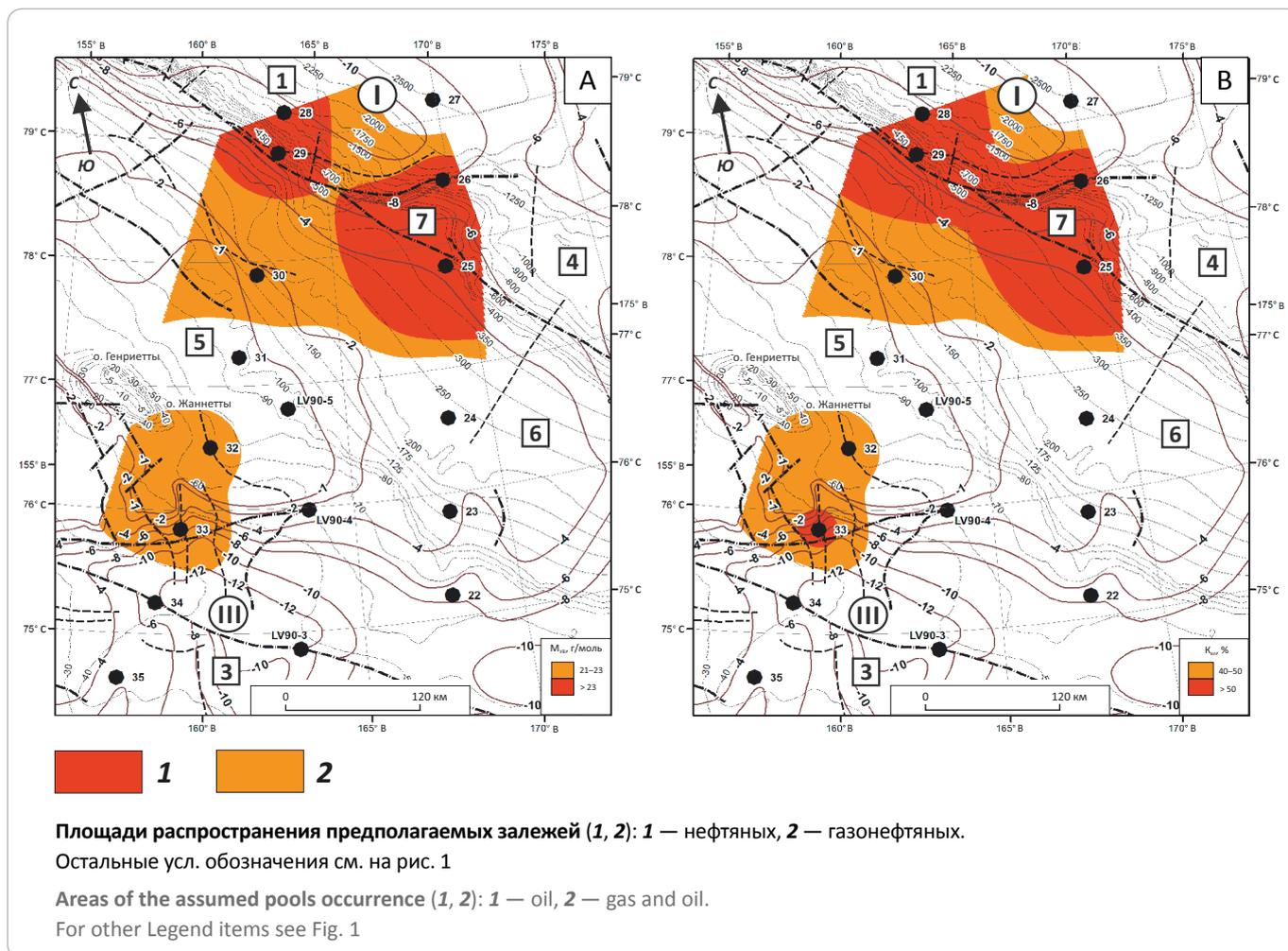
For Legend see Fig. 1



GEOCHEMICAL SURVEYS

Рис. 7. Схематическая карта распределения УВ-газов прогнозных нефтяных и газонефтяных залежей западной части района исследований по данным газогеохимических показателей $M_{\text{УВ}}$ (А) и $K_{\text{вл}}$ (В)

Fig. 7. Schematic map of HC gases distribution in the predicted oil and gas and oil pools of the western part of the study area in accordance with the gas-geochemical indicators $M_{\text{УВ}}$ (А) and $K_{\text{вл}}$ (В)



ро-западного крыла Новосибирского бассейна (одноименного прогиба).

К аналогичным территориям восточной части района исследований относятся южное крыло и центральная часть Северо-Чукотского бассейна (рис. 8), станции 480, 530–560.

Формирование **высокоперспективных** прогнозных нефтегазовых залежей района исследований установлено в пределах Новосибирского и Предвосточносибирского бассейнов (станции 27, 34, 35), восточного крыла поднятия Де-Лонга (станция 31), Северной структурной террасы (станция 24), а также Северо-Чукотского бассейна (станции 480, 530, 560) (см. рис. 8).

Распределение **перспективных** прогнозных залежей газа, конденсата и битумов в пределах донных станций района исследований представлено в табл. 1.

Следует отметить, что Северо-Чукотский, Предвосточносибирский бассейны и разделяющие их

геоструктуры расположены в Восточно-Арктической перспективной нефтегазоносной провинции, начальные ресурсы нефти которой оцениваются в 6 млрд т, попутного газа — 18 млрд м³, свободного газа — 4,7 трлн м³ и конденсата — 17 млн т [27].

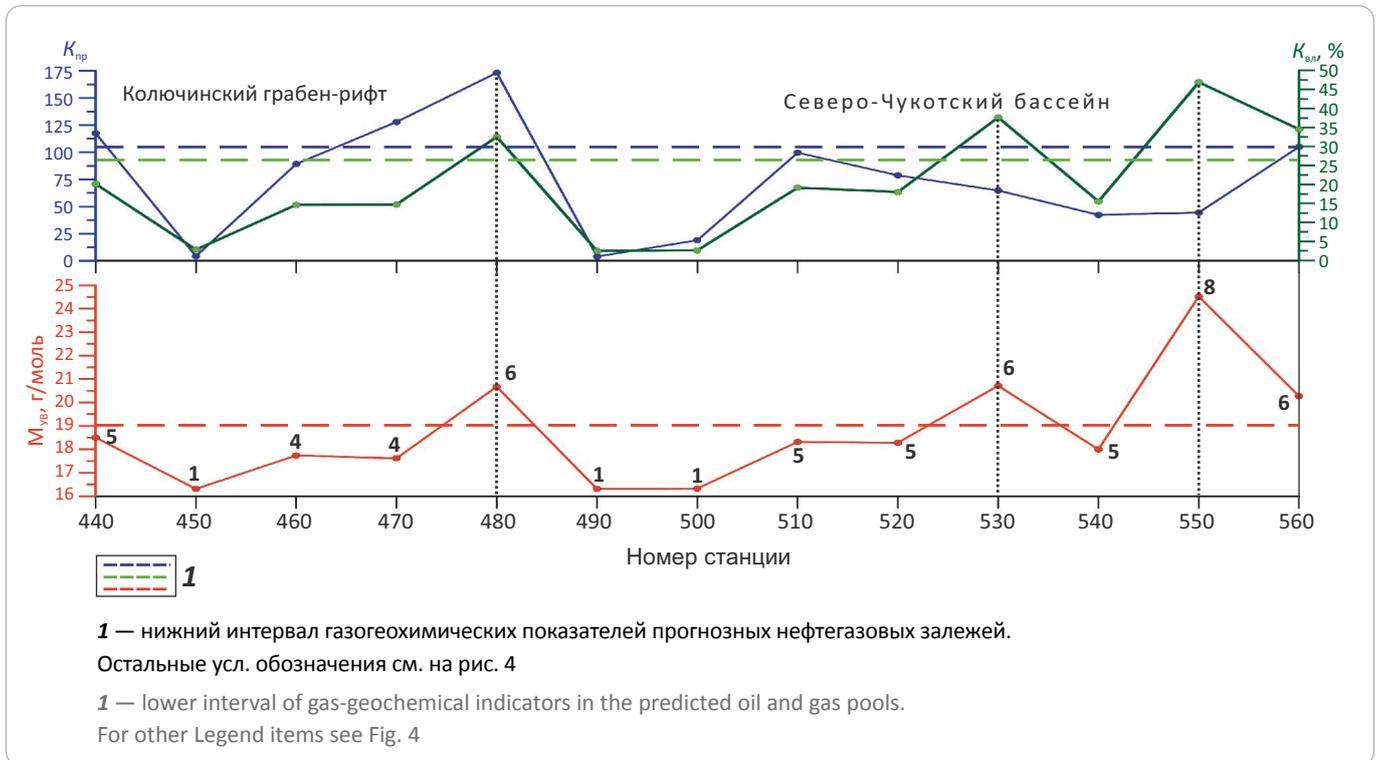
Заключение

В составе природных газов донных отложений района исследований установлены метан, УВ-газы, углекислый газ, оксид углерода, водород, гелий, сероводород, аргон и азот различного происхождения. Исходя из значений газогеохимических показателей, в изученных отложениях доминируют эпигенетические газы восьми предполагаемых газоматеринских источников. Сингенетические газы в осадках имеют подчиненное значение и ограниченный характер образования.

Формирование газовой фазы осадков в целом подчиняется правилам аддитивности — последовательного накопления газов различного генезиса с

Рис. 8. Распределение газогеохимических показателей УВ-газов донных отложений восточной части района исследований по профилю 5AP

Fig. 8. Distribution of gas-geochemical indicators of HC gases from the seafloor formations in the eastern part of the study area, 5AP Line



доминированием газовой составляющей и газогеохимических показателей более газонасыщенного газоматеринского источника.

Установлено, что газонасыщенность и газогеохимическое районирование донных отложений зависят от комплекса основных газоконтролирующих факторов — геологического строения, складчатой и разрывной тектоники, битуминозности и нефтега-

зоносности, угленосности и органической насыщенности, литологического состава, геокриологических, гидродинамических и других условий образования, накопления газов или их дегазации.

Исходя из результатов газогеохимических работ, можно сделать вывод, что осадочные бассейны и геоструктуры района исследований имеют высокие перспективы нефтегазоносности.

Авторы выражают благодарность руководству ФГУНПП «Севморгео», А.С. Астахову, Р.Б. Шакирову и Ю.П. Василенко (ТОИ ДВО РАН) за поддержку в проведении морских экспедиционных газогеохимических исследований, В.В. Калининскому (ТОИ ДВО РАН) за помощь в отборе проб донных осадков.

Литература

1. Пискарев А.Л. Арктический бассейн (геология и морфология). — СПб. : ВНИИОкеангеология, 2016. — 291 с.
2. O'Regan M., Backman J., Barrientos N., Cronin T.M., Gemery L., Kirchner N., Mayer L.A., Nilsson J., Noormets R., Pearce C., Semiletov I.P., Stranne C., Jakobsson M. The De Long Trough: a newly discovered glacial trough on the East Siberian continental margin // *Climate of the Past*. — 2017. — № 13. — С. 1269–1284. DOI: 10.5194/cp-13-1269-2017.
3. Гусев Е.А., Рекант П.В., Большианов Д.Ю., Лукашенко Р.В., Попко А.О. Псевдогляциальные структуры подводных гор поднятия Менделеева и континентальной окраины Восточно-Сибирского моря // *Проблемы Арктики и Антарктики*. — 2013. — Т. 98. — № 4. — С. 43–55.
4. Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И., Зарубина Н.В. Газогеохимические особенности осадков Восточно-Сибирского моря // *Вестник ДВО РАН*. — 2010. — № 6. — С. 101–108.
5. Гресов А.И., Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П., Яцук А.В. Изотопно-геохимические показатели углеводородных газов донных осадков шельфа Восточно-Сибирского моря // *Доклады Академии наук*. — 2016. — Т. 469. — № 6. — С. 711–713. DOI: 10.7868/S086956521624018X.

GEOCHEMICAL SURVEYS

6. Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В., Мазуров А.К., Рубан А.С. Газоносность донных осадков и геохимические признаки нефтегазоносности шельфа Восточно-Сибирского моря // Тихоокеанская геология. – 2017. – Т. 36. – № 4. – С. 77–84.
7. Гресов А.И., Яцук А.В. Геологические условия формирования газонасыщенности донных отложений осадочных бассейнов юго-восточного сектора Восточно-Сибирского моря // Геология и геофизика. – 2021. – Т. 62. – № 2. – С. 197–215. DOI: 10.15372/GiG2020104.
8. Гресов А.И., Сергиенко В.И., Яцук А.В., Зарубина Н.В., Калинин В.В. Газогеохимические показатели донных отложений северной части Восточно-Сибирского моря и котловины Подводников Северного Ледовитого океана // Доклады Академии наук. – 2020. – Т. 492. – № 1. – С. 113–117. DOI: 10.31857/S2686739720050072.
9. Хаин В.Е., Полякова И.Д., Филатова Н.И. Тектоника и нефтегазоносность восточной Арктики // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50. – № 4. – С. 443–460.
10. Государственная геологическая карта. Серия Лаптево-Сибироморская, Океанская. Масштаб 1 : 1 000 000. Лист Т-57-60 — остров Генриетты. Объяснительная записка. Масштаб 1 : 1 000 000. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2015. – 84 с.
11. Ким Б.И., Евдокимова Н.К., Супруненко О.И., Яшин Д.С. Нефтегеологическое районирование шельфа восточно-арктических морей России и перспективы их нефтегазоносности // Геология нефти и газа. – 2007. – № 2. – С. 49–58.
12. Казанин Г.С., Барабанова Ю.Б., Кириллова-Покровская Т.А., Черников С.Ф., Павлов С.П., Иванов Г.И. Континентальная окраина Восточно-Сибирского моря: геологическое строение и перспективы нефтегазоносности // Разведка и охрана недр. – 2017. – № 10. – С. 51–55.
13. Государственная геологическая карта России и прилегающих акваторий. Масштаб 1 : 2 500 000. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2016.
14. Руководство по определению и прогнозу газоносности вмещающих пород при геологоразведочных работах. — Ростов-на-Дону : ВНИИГРИУголь, 1985. – 96 с.
15. Abrams M.A. Significance of hydrocarbon seepage to petroleum generation and entrapment // Marine and Petroleum Geology. – 2005. – Т. 22. – № 4. – С. 457–477. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2004.08.003.
16. Нестеров И.И. Критерии прогнозов нефтегазоносности. – М. : Недра, 1969. – 334 с.
17. Гресов А.И. Геохимическая классификация углеводородных газов углеводородных бассейнов Востока России // Тихоокеанская геология. – 2011. – Т. 30. – № 2. – С. 87–103.
18. Казанин Г.С., Верба М.Л., Иванов Г.И., Кириллова-Покровская Т.А., Смирнов О.Е. Тектоническая карта Восточно-Сибирского моря: роль палеозойского комплекса осадочного чехла (по сейсмическим данным МАГЭ) // Разведка и охрана недр. – 2017. – № 10. – С. 61–67.
19. Sherwood K.W., Craig J.D., Cook L.W. et al. Undiscovered oil and gas resources / Alaska Federal Offshore. As of January 1995. U.S. Department of the Interior Minerals Management Service, Alaska OCS Monograph, MMS 98-0054; 1998. – 531 с.
20. Малышев Н.А., Обметко В.В., Бородулин А.А., Баранова Е.М., Ихсанов Б.И. Тектоника осадочных бассейнов российского шельфа Чукотского моря // Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя : мат-лы XXIII Тектонического совещания. – М. : ГИН РАН, 2010. – Т. 2. – С. 23–29.
21. Поселов В.А., Буценко В.В., Жолондз С.М., Жолондз А.С., Киреев А.А. Сейсмостратиграфия осадочного бассейна котловины Подводников и Северо-Чукотского прогиба // Доклады Академии наук. – 2017. – Т. 474. – № 5. – С. 621–624. DOI: 10.7868/S0869565217050206.
22. Клубов Б.А. Природные битумы Севера. – М. : Недра, 1983. – 205 с.
23. Флюидогеодинамика и нефтегазоносность северо-восточной окраины Азии. Масштаб 1 : 2 500 000 / Под ред. Ю.А. Косыгина. – Хабаровск : Дальаэрогеодезия ГУГК, 1989. – 102 с.
24. Геология и полезные ископаемые шельфов России. Арктические моря / Под ред. И.С. Грамберга, В.Л. Иванова, Ю.Е. Погребницкого. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2004. – Т. 5. – Кн. 1. – 468 с.
25. Гресов А.И. Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока и перспективы ее промышленного освоения. Т. II. Углеметановые бассейны Якутии и Северо-Востока России. – Владивосток : Дальнаука, 2012. – 468 с.
26. Гресов А.И., Яцук А.В. Геохимические признаки нефтегазоносности Восточно-Сибирского моря // Геология нефти и газа. – 2020. – № 4. – С. 83–96. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-4-83-96.
27. Конторович А.Э., Эпов М.И., Буриштейн Л.М., Каминский В.Д., Курчиков А.Р., Малышев Н.А., Прищеп О.М., Сафронов А.Ф., Ступакова А.В., Супруненко О.И. Геология, ресурсы углеводородов шельфов арктических морей России и перспективы их освоения // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – № 1. – С. 7–17.
28. Алексеев А.Ф., Бодунов Е.И., Лебедев В.С., Захарова С.С., Томская Е.С., Безменова П.Н., Трущелева Г.С., Лебедев В.С. Изотопно-геохимическая характеристика нефтей и газов восточной части Сибирской платформы. Органическая геохимия нефтей, газов и органического вещества докембрия / Под ред. А.А. Алексеева. – М. : Наука, 1981. – С. 164–175.
29. Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В. К вопросу водородности углеводородных бассейнов Дальнего Востока // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2010. – № 1. – С. 231–244.
30. Соколов В.А. Геохимия природных газов. – М. : Недра, 1971. – 336 с.

References

1. Piskarev A.L. Arkticheskiy bassein (geologiya i morfologiya) [Arctic basin (geology and morphology)]. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya; 2016. 291 p. In Russ.
2. O'Regan M., Backman J., Barrientos N., Cronin T.M., Gemery L., Kirchner N., Mayer L.A., Nilsson J., Noormets R., Pearce C., Semiletov I.P., Stranne C., Jakobsson M. The De Long Trough: a newly discovered glacial trough on the East Siberian continental margin. *Climate of the Past*. 2017;(13):1269–1284. DOI: 10.5194/cp-13-1269-2017.
3. Gusev E.A., Rekant P.V., Bol'shiyanov D.Yu., Lukashenko R.V., Popko A.O. Pseudoglyatsial'nye struktury podvodnykh gor podnyatiya Mendeleeva i kontinental'noi okrainy Vostochno-Sibirskogo moray [Pseudoglacial structures of Mendeleev Rise seamounts and East Siberian continental margin]. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2013;98(4):43–55. In Russ.

4. *Shakirov R.B., Sorochinskaya A.V., Obzhairov A.I., Zarubina N.V.* Gazoekhimicheskie osobennosti osadkov Vostochno-Sibirskogo moray [Gas-geochemical features of sediments of the East Siberian Sea]. *Vestnik DVO RAN*. 2010;(6):101–108. In Russ.
5. *Gresov A.I., Shakhova N.E., Sergienko V.I., Semiletov I.P., Yatsuk A.V.* Isotope and Geochemical Parameters of Hydrocarbon Gases in Bottom Sediments of the Shelf of the East Siberian Sea. *Doklady Earth Sciences*. 2016;469(6):711–713. DOI: 10.1134/S1028334X16080225. In Russ.
6. *Gresov A.I., Yatsuk A.V., Obzhairov A.I., Mazurov A.V., Ruban A.S.* Gas content of Bottom Sediments and Geochemical Indicators of Oil and Gas on the Shelf of the East Siberian Sea. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2017;11(4):308–314. DOI: 10.1134/S1819714017040030. In Russ.
7. *Gresov A.I., Yatsuk A.V.* Geological implications for gas saturation of bottom sediments in sedimentary basins in the southeastern sector of the East Siberian Sea. *Russian geology and geophysics*. 2021;62(2):157–172. DOI: 10.2113/RGG20194075.
8. *Gresov A.I., Sergienko V.I., Yatsuk A.V., Zarubina N.V., Kalinchuk V.V.* Gas-Geochemical Parameters of Bottom Sediments in the Northern Part of the East Siberian Sea and Podvodnikov Basin of the Arctic Ocean. *Doklady Earth Sciences*. 2020;492(1):113–117. DOI: 10.1134/S1028334X20050074. In Russ.
9. *Khain V.E., Polyakova I.D., Filatova N.I.* Tectonics and petroleum potential of the East Arctic province. *Russian geology and geophysics*. 2009;50(4):443–460. In Russ.
10. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta. Seriya Laptevo-Sibiromorskaya, Okeanskaya. Mashtab 1 : 1 000 000. List T-57-60 — ostrov Genrietty. Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map. Series Laptevo-Siberian Sea, Oceanic. Scale 1: 1 000 000. Sheet T-57-60 - Henrietta's island. Explanatory note]. Saint Petersburg: VSEGEI; 2015. 84 p. In Russ.*
11. *Kim B.I., Evdokimova N.K., Suprunenko O.I., Yashin D.S.* Neftegeologicheskoe raionirovanie shel'fa vostochno-arkticheskikh morei Rossii i perspektivy ikh neftegazonosnosti [Oil-geological zoning of the shelf of the Eastern Arctic seas of Russia and the prospects of their oil and gas potential]. *Geologiya nefi i gaza*. 2007;(2):49–58. In Russ.
12. *Kazanin G.S., Barabanova Yu.B., Kirillova-Pokrovskaya T.A., Chernikov S.F., Pavlov S.P., Ivanov G.I.* Kontinental'naya okraina Vostochno-Sibirskogo morya: geologicheskoe stroenie i perspektivy neftegazonosnosti [Continental margin of the East Siberian Sea: geological structure and oil and gas potential]. *Razvedka i okhrana nedr*. 2017;(10):51–55. In Russ.
13. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossii i prilgayushchikh akvatorii. Mashtab 1 : 2 500 000 [State geological map of Russia and surrounding water areas. Scale 1: 2 500 000]. St. Petersburg: VSEGEI; 2016. In Russ.*
14. *Rukovodstvo po opredeleniyu i prognozu gazonosnosti vmeshchayushchikh porod pri geologorazvedochnykh rabotakh [Guidelines for determining and forecasting the gas content of host rocks during exploration]. Rostov-on-Don: VNIIGRlugol'; 1985. 96 p. In Russ.*
15. *Abrams M.A.* Significance of hydrocarbon seepage to petroleum generation and entrapment. *Marine and Petroleum Geology*. 2005;22(4):457–477. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2004.08.003.
16. *Nesterov I.I.* Kriterii prognozov neftegazonosnosti [Criteria for oil and gas forecasts]. Moscow: Nedra; 1969. 334 p. In Russ.
17. *Gresov A.I.* Geochemical classification of hydrocarbon gases of the coal basins of East Russia. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2011;5(2):164–179. DOI: 10.1134/s1819714011020047. In Russ.
18. *Kazanin G.S., Verba M.L., Ivanov G.I., Kirillova-Pokrovskaya T.A., Smirnov O.E.* Tektonicheskaya karta Vostochno-Sibirskogo morya: rol' paleozoiskogo kompleksa osadochnogo chekhla (po seismicheskim dannym MAGE) [Tectonic map of the East Siberian Sea: the role of the Paleozoic complex of the sedimentary cover (according to seismic data from MAGE)]. *Razvedka i okhrana nedr*. 2017;(10):61–67. In Russ.
19. *Sherwood K.W., Craig J.D., Cook L.W. et al.* Undiscovered oil and gas resources. In: Alaska Federal Offshore. As of January 1995. U.S. Department of the Interior Minerals Management Service, Alaska OCS Monograph, MMS 98-0054; 1998. 531 p.
20. *Malyshev N.A., Obmetko V.V., Borodulin A.A., Barinova E.M., Ikhsanov B.I.* Tektonika osadochnykh basseinov rossiiskogo shel'fa Chukotskogo morya [Tectonics of sedimentary basins of the Russian shelf of the Chukchi Sea]. In: Tektonika i geodinamika skladchatykh pojasov i platform fanerozoaya: materialy XXIII Tektonicheskogo soveshchaniya. Moscow: GIN RAN; 2010. Vol. 2. pp. 23–29. In Russ.
21. *Poselov V.A., Butsenko V.V., Zholondz S.M., Zholondz A.S., Kireev A.A.* Seismic stratigraphy of sedimentary cover in the Podvodnikov Basin and North Chukchi trough. *Doklady Earth Sciences*. 2017;474(5):688–691. DOI: 10.1134/s1028334x17060137.
22. *Klubov B.A.* Prirodnye bitумы Severa [Natural bitumen of the North]. Moscow: Nedra; 1983. 205 p. In Russ.
23. *Flyuidogeodinamika i neftegazonosnost' severo-vostochnoi okrainy Azii. Mashtab 1 : 2 500 000 [Fluid geodynamics and oil and gas potential of the North-Eastern of Asia Scale 1: 2 500 000]. In: Yu.A. Kosygin, ed. Khabarovsk: Dal'aehrogeodeziya GUGK; 1989. 102 p. In Russ.*
24. *Geologiya i poleznye iskopaemye shel'fov Rossii. Arkticheskie moray [Geology and mineral resources of Russia. Arctic and Far East Seas]. In: I.S. Gramberg, V.L. Ivanov, Yu.E. Pogrebitskii, eds. St. Petersburg: VSEGEI; 2004. Vol. 5. Book 1. 468 p. In Russ.*
25. *Gresov A.I.* Metanoresursnaya baza ugol'nykh basseinov Dal'nego Vostoka i perspektivy ee promyshlennogo osvoeniya. T. II. Uglemetanovyе basseiny Yakutii i Severo-Vostoka Rossii [Methane resources of coal basins in the Far East Russia and their perspective industrial development perspectives. V. II. Coal methane basins of Sakha Republic (Ikutia) and Nord-East]. Vladivostok: Dal'nauka; 2012. 468 p. In Russ.
26. *Gresov A.I., Yatsuk A.V.* Gas geochemical indicators of oil and gas occurrence in south-eastern part of East Siberian Sea. *Geologiya nefi i gaza*. 2020;(4):83–96. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-4-83-96. In Russ.
27. *Kontorovich A.Eh., Ehpov M.I., Burshtein L.M., Kaminskii V.D., Kurchikov A.R., Malyshev N.A., Prishchepa O.M., Safronov A.F., Stupakova A.V., Suprunenko O.I.* Geology and hydrocarbon resources of the continental shelf in Russian arctic seas and the prospects of their development. *Russian geology and geophysics*. 2010;51(1):7–17.
28. *Alekseev A.F., Bodunov E.I., Lebedev V.S., Zakharova S.S., Tomskaya E.S., Bezmenova P.N., Trushcheleva G.S., Lebedev V.S.* Izotopno-geokhimicheskaya kharakteristika neftei i gazov vostochnoi chasti Sibirskoi platformy. Organicheskaya geokhimiya neftei, gazov i organicheskogo veshchestva dokembriya [Isotope-geochemical characteristics of oils and gases in the eastern part of the Siberian platform]. In: A.A. Alekseev, ed. Moscow: Nauka; 1981. pp. 164–175. In Russ.
29. *Gresov A.I., Obzhairov A.I., Yatsuk A.V.* K voprosu vodorodonosnosti ulegazonosnykh basseinov Dal'nego Vostoka [On the issue of hydrogen content in coal and gas basins of the Far East]. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*. 2010;(1):231–244. In Russ.
30. *Sokolov V.A.* Geokhimiya prirodnykh gazov [Geochemistry of natural gases]. Moscow: Nedra; 1971. 336 p. In Russ.

GEOCHEMICAL SURVEYS

Информация об авторах

Гресов Александр Иванович

Доктор геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник
ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт
имени В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43
e-mail: gresov@poi.dvo.ru
ORCID ID: 0000-0002-2133-411X

Яцук Андрей Вадимович

Кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник
ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт
имени В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43
e-mail: yatsuk@poi.dvo.ru
ORCID ID: 0000-0003-3975-5438

Сырбу Надежда Сергеевна

Кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией
ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт
имени В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041 Владивосток, ул. Балтийская, 43
e-mail: syrbu@poi.dvo.ru
ORCID ID: 0000-0002-14416133

Окулов Алексей Константинович

Научный сотрудник
ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт
имени В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43
e-mail: okulov_ak@poi.dvo.ru

Information about authors

Alexander I. Gresov

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences,
Leading researcher
V.I. Il'ichev Pacific
Oceanological Institute,
43, Baltiiskaya, Vladivostok, 690041, Russia
e-mail: gresov@poi.dvo.ru
ORCID ID: 0000-0002-2133-411X

Andrey V. Yatsuk

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
Senior Researcher
V.I. Il'ichev Pacific
Oceanological Institute,
43, Baltiiskaya, Vladivostok, 690041, Russia
e-mail: yatsuk@poi.dvo.ru
ORCID ID: 0000-0003-3975-5438

Nadezhda S. Syrbu

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
Head of Laboratory
V.I. Il'ichev Pacific
Oceanological Institute,
43, Baltiiskaya, Vladivostok, 690041, Russia
e-mail: syrbu@poi.dvo.ru
ORCID ID: 0000-0002-14416133

Alexey K. Okulov

Researcher
V.I. Il'ichev Pacific
Oceanological Institute,
43, Baltiiskaya, Vladivostok, 690041, Russia
e-mail: okulov_ak@poi.dvo.ru