

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОСАДОЧНЫХ БАССЕЙНОВ ЮГО-ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

А.И. Гресов, А.В. Яцук

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия*

Приведены результаты изучения геологического строения Лонгского, Айонского и Пегтымельского осадочных бассейнов Восточно-Сибирского моря. Обобщены и проанализированы материалы геологических съемок и бурения материкового и островного обрамления, геофизических исследований ОАО «Дальморнефтегеофизика», Морской арктической геолого-разведочной экспедиции и ОАО «Севморгеология», а также сейсморазведочных работ и бурения глубоких скважин в американском секторе Чукотского моря. В результате исследований разреза осадочных бассейнов выделены допалеозойские образования и осадочный чехол на всю его мощность, что позволяет говорить не об условном горизонте под названием «акустический фундамент», а о геологической границе «чехол—фундамент».

Данные о геологическом строении и газонасыщенности верхней части осадочного разреза получены в результате изучения и газогеохимического опробования керна пород и донных осадков прибрежных мелких скважин и керноотборных трубок. В составе газа пород и донных осадков района исследований установлены: углеводородные газы (CH_4 , C_2 – C_5 и их непредельные гомологи — УВГ), CO_2 , H_2 , He, N_2 и Ar, редко — CO и H_2S . Приведены газогеохимические показатели сингенетических и эпигенетических газов донных осадков и данные их газонасыщенности. Выделены площади аномальной газонасыщенности осадков по CO_2 , CH_4 и УВГ, H_2 и He, превышающие 5, 0.05 и 0.001, 0.005 и 0.005 cm^3/kg соответственно. Составлены карты распределения газонасыщенности донных осадков.

Установлено, что основными геологическими факторами, влияющими на формирование и распределение газонасыщенности донных отложений, являются история геологического развития, тектоника, магматизм, литологический состав и катагенез осадочных пород, геокриологические условия, угленосность, битуминозность и нефтегазоносность района исследований.

Осадочный бассейн, геологическое строение, донные отложения, состав газа, газогеохимические показатели, генезис, газоматеринские источники, газонасыщенность, геологические факторы, Восточно-Сибирское море

GEOLOGICAL IMPLICATIONS FOR GAS SATURATION OF BOTTOM SEDIMENTS IN SEDIMENTARY BASINS IN THE SOUTHEASTERN SECTOR OF THE EAST SIBIRIAN SEA

A.I. Gresov, A.V. Yatsuk

We present research results for the geologic structure of the De Long, Aion, and Pegtymel sedimentary basins of the East Siberian Sea. The materials of geological surveys and drilling in their land area and island surroundings, the data obtained from geophysical surveys conducted by Dal'morneftegeofizika, MAGE, and Sevmoregeologiya, and the seismic and deep drilling data on the U.S. sector of the Chukchi Sea are summarized and analyzed. Pre-Paleozoic strata and the sedimentary cover have been identified throughout the sections of the sedimentary basins, which suggests the existence of a geologic “cover–basement” boundary rather than an arbitrary called “acoustic basement” horizon. The data on the geologic structure and gas saturation of the upper parts of the sedimentary sections were obtained during the study and gas-geochemical testing of core samples and bottom sediments from coastal shallow wells and corers. Gas contained in the rocks and bottom sediments in the study area includes hydrocarbon gases (HCGs) (CH_4 , C_2 – C_5 , and their unsaturated homologues), CO_2 , H_2 , He, N_2 , Ar, and, seldom, CO and H_2S . The data on gas saturation of bottom sediments and the geochemical parameters of their syngenetic and epigenetic gases are presented. Areas of abnormal saturation of sediments with CO_2 , CH_4 , other HCGs, H_2 , and He (>5, 0.05, 0.001, 0.005, and 0.005 cm^3/kg , respectively) have been identified, and maps of the gas saturation patterns in bottom sediments have been compiled. It is established that both gas saturation and distribution are determined mainly by the geologic evolution, tectonics, magmatism, geocryologic conditions, lithologic composition, catagenesis, coal content, bituminosity of sedimentary rocks, and oil and gas potential of the study area.

Sedimentary basin, geologic structure, bottom sediments, gas composition, geochemical parameters of gas, genesis, gas sources, gas saturation, geologic factors, East Siberian Sea

ВВЕДЕНИЕ

В современной структуре шельфа юго-восточного сектора Восточно-Сибирского моря (ВСМ) выделяются Айонский, Лонгский и Пегтымельский осадочные бассейны, история газогеохимических исследований которых может быть подразделена на три этапа. Начальный этап, относящийся к периоду 1967—1989 гг., характеризовался изучением состава газа пород и газопроявлений (рис. 1) материкового и островного обрамления Чаунской губы [Трофимук и др., 1973; Никитин и др., 1985; Флюидогеодинамика..., 1989]. Первые сведения о газонасыщенности донных осадков в районе о. Айон и прол. Лонга получены сотрудниками НИИГА в период 1975—1981 гг.¹ Позже сотрудниками треста «Дальвостуглеразведка» и производственного объединения «Северовостокзолото» было проведено изучение состава газа и газонасыщенности угольных пластов и вмещающих пород, а также газонасыщенности четвертичных

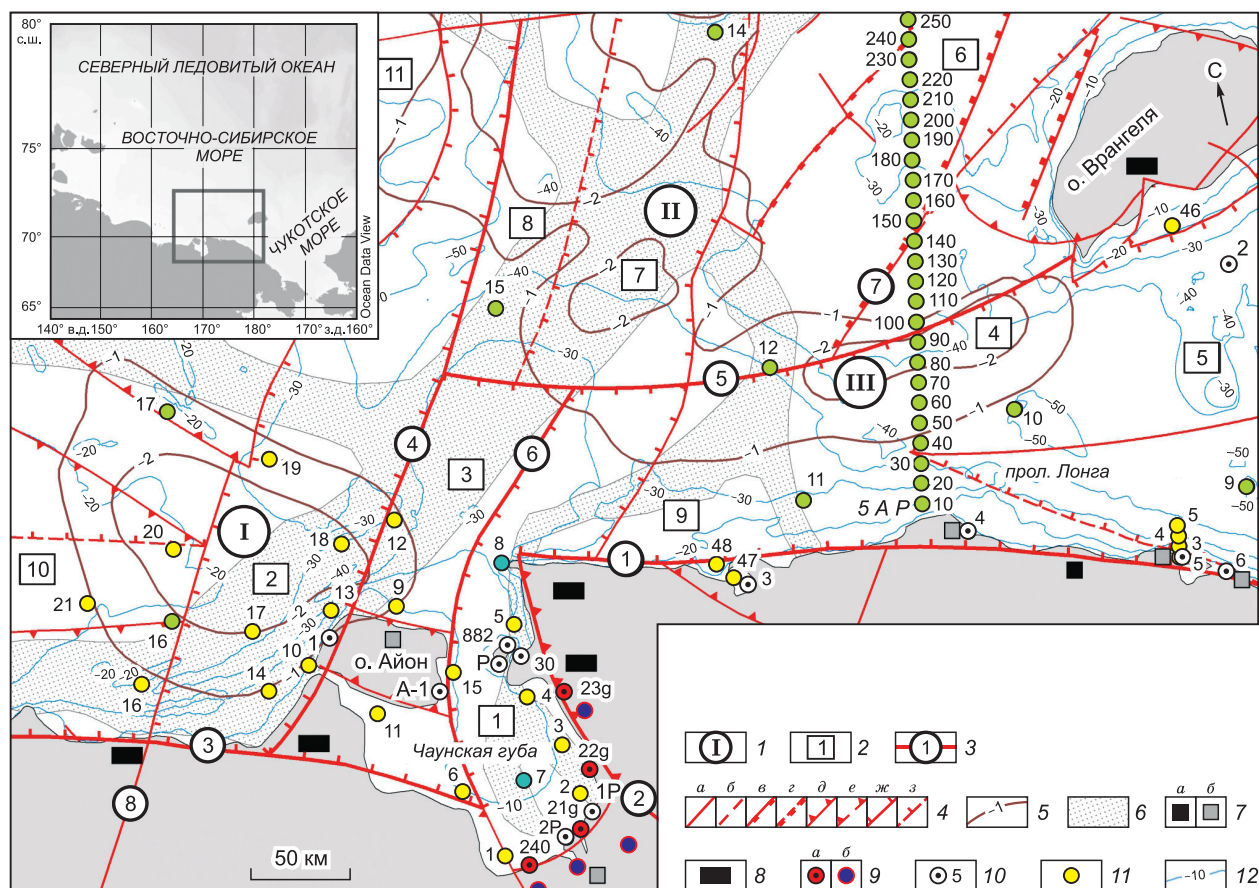


Рис. 1. Структурно-тектоническая карта юго-восточного сектора Восточно-Сибирского моря [Геология..., 2003] с дополнениями [Государственная..., 2016a]:

1 — осадочные бассейны: I — Айонский, II — Пегтымельский, III — Лонгский [Петровская, Савишкина, 2014]; 2 — геоструктуры: 1 — Чаунская впадина, 2 — Айонская впадина, 3 — Айонское поднятие, 4 — впадина Лонга, 5 — поднятие Врангеля, 6 — Северо-Шелагское поднятие, 7 — Пегтымельская впадина, 8 — Пегтымельское поднятие, 9 — Шелагское поднятие, 10 — Медвежинское поднятие, 11 — Барановское поднятие; 3 — разломы: 1 — Шелагский, 2 — Чаунский, 3 — Нейглин-Наглейненский, 4 — Северо-Айонский, 5 — Врангелевский, 6 — Северо-Чаунский, 7 — Северо-Врангелевский, 8 — Восточно-Раучуанский; 4 — тектонические нарушения: а — достоверные, б — предполагаемые; в, з — сбросы (штрихи на опущенном крыле); д, е — взбросы (штрихи на приподнятом крыле); ж, з — неустановленного типа; 5 — изолинии гетерогенного фундамента, км [Государственная..., 2016a]; 6 — погребенные долины палеорек [Геология..., 2003]; 7 — углепроявления: а — бурого угля, б — каменного угля [Фандошкин, 2006]; 8 — битумопроявления; 9 — газопроявления: а — из скважин, б — из водных источников [Флюидогеодинамика..., 1989]; 10 — скважины и их номера; 11 — станции отбора донных осадков и их номера (желтая заливка — первого этапа исследований, голубая — второго, зеленая — третьего); 12 — батиметрические отметки [Jakobsson, 2012]. На врезке — географическое расположение района исследований.

¹ Органическое вещество и углеводородные газы донных отложений арктических морей СССР: отчет о НИР/ Д.С. Яшин, Л., НИИГА, 1981.

прибрежных и донных осадков Чаунской и Валькарайской впадин с целью определения степени газобезопасности буровых работ на участках выходов пластов угля под наносы.²

В период 1990—2007 гг. проведено обобщение данных газогеохимических работ в пределах восточно-арктического шельфа [Геология..., 2003, 2004; Яшин, Ким, 2007] на фоне единичного газового опробования донных осадков Чаунской губы и изучения газонасыщенности поверхностных и придонных вод [Шахова и др., 2005].

Начиная с 2008 г. и по настоящее время изучение газонасыщенности донных осадков юго-восточного сектора ВСМ носит целенаправленный и комплексный характер. Определение газонасыщенности донных отложений осуществлялось совместно с изучением газонасыщенности поверхностных и придонных вод, приводной атмосферы в комплексе с геофизическими исследованиями. Результаты исследований приведены в [Половков, 2011; Шакиров и др., 2013; Астахов и др., 2013; Верба, 2016; Гресов и др., 2016, 2017; Казанин и др., 2017].

Основная задача работы заключалась в обобщении и сравнительном научном анализе геологического строения района исследований и данных газогеохимических исследований, позволяющих приблизиться к реальному пониманию геологической природы формирования и распределения газонасыщенности донных отложений.

МЕТОДИКА И ОБЪЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучение газоносности угольных пластов и вмещающих пород побережья района исследований осуществлялось методом отбора керна пород в герметические сосуды с последующей их дегазацией и хроматографическим анализом газа. В процессе работ отобрано 20 герметических сосудов и проанализировано 55 проб газа², извлеченного при свободном выделении, вакуумной и термовакуумной дегазации. В пределах прибрежной акватории из керна четырех скважин отобрано 12 герметических сосудов (в интервале глубин 0.7—9.6 м), в результате дегазации которых извлечено 29 проб газа². Отбор, дегазация проб и проведение анализа газа соответствовали действующему методическому руководству³.

Опробование донных осадков осуществлялось дночерпателями (5 станций в интервале отбора 0.2—0.4 м от дна) и керноотборными трубками (57 станций — 0.6—4.0 м) на глубинах моря 3—45 м с поинтервальным отбором проб грунта в герметические сосуды и последующей их дегазацией и анализом газа. В процессе опробования отобрано 124 герметических сосуда и проанализировано 267 проб газа, извлеченных на разных стадиях дегазации. Методика газогеохимических исследований соответствовала руководству³.

Анализ газа пород и донных осадков производился в сертифицированных газовых лабораториях треста «Дальвостуглеразведка» и Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН на хроматографах Газохром 3101, Газохром 2000, ЛХМ-8МД и КристалЛюкс-4000М в соответствии с ГОСТ 23781-79, ГОСТ 23781-83, ГОСТ 23781-87⁴, ГОСТ 31371.3-2008⁵ и нормативных документов паспортов вышеуказанных лабораторий, аттестованных Росстандартом.

В результате систематизации данных и применения методов электронного графопостроения составлены карты газонасыщенности донных осадков. Оцифровка и пространственно-математическая интерпретация результатов газогеохимических исследований производилась в программном комплексе ESRI@ArcGIS с помощью модуля Geostatistical Analyst по методу обратных взвешенных расстояний (IDW).

Интерпретация результатов геохимических исследований. Для определения генезиса углеводородных газов (УВГ) использован комплекс количественных геохимических показателей: молекулярной массы углеводородной фракции ($M_{УВ}$), весовых концентраций индивидуальных углеводородов (УВ) [Велев, 1981] и их соотношений, являющихся индивидуальными генетическими маркерами для каждого геологического образования [Гресов, 2011, 2012, 2014]. В процессе исследований использовались данные изотопного состава углерода $\delta^{13}C$ CH_4 , C_2H_6 и CO_2 [Шакиров и др., 2013; Гресов и др., 2016, 2017]. Данный комплексный методологический подход характеризуется достаточной информативностью получаемых результатов в области классифицирования генезиса газа [Гресов, 2011, 2014].

² Изучение изменчивости распределения природных газов в угленосных толщах с целью разработки рекомендаций по повышению достоверности и газобезопасности геолого-разведочных работ: отчет о НИР / А.И. Гресов, т. 1, 2, 3. Владивосток, Дальвостуглеразведка, 1987.

³ Руководство по определению и прогнозу газоносности вмещающих пород при геолого-разведочных работах. Ростов-на-Дону, ВНИИГРИуголь, 1985, 96 с.

⁴ Газы горючие природные. Хроматографический метод определения компонентного состава. М., Госстандарт, 1979, 1983, 1987, 12 с.

⁵ Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. М., Стандартинформ, 2009, 16 с.

Молекулярная масса УВ фракции — величина средневзвешенной по массе ее индивидуальных членов ряда метан—пентан ($C_1—C_5$, г/моль) и *весовая концентрация УВ*, нормированная по отношению к $M_{УВ}$ в долях целого на 1000, использовались как единый количественный показатель генетических особенностей УВГ современных донных осадков, газовых и угольных залежей, магматических образований, газоконденсатных, конденсатно-газовых, газонефтяных и нефтегазовых скоплений и залежей.

Коэффициент преобразованности УВ фракции. Изменение состава УВГ в процессе их длительного существования в коллекторах в условиях меняющейся термобарической и геохимической обстановки сопровождается изменением содержаний гомологов метана. С увеличением температуры происходит перераспределение в содержании гомологов метана — превращение пропана в этан и бутан, а также пропана и бутана в этан и пентан [Нестеров, 1969]. Для оценки степени преобразования гомологов метана используется отношение произведения весовых концентраций этана и бутана к концентрации пропана, названное коэффициентом преобразованности УВ фракции [Высоцкий, 1979], в виде выражения: $K_{пр.} = (C_2 \cdot C_4) : C_3$. Установлено, что коэффициент достаточно тесно связан с возрастом газоносного коллектора, т. е. указывает на продолжительность нахождения газа в ловушке [Высоцкий, 1979; Гресов, 2011, 2012].

Коэффициенты обогащенности («сухости») и «влажности» УВ фракции, представленные соотношением $C_1 : \sum C_2—C_5$ [Высоцкий, 1979] и $\sum C_2—C_5 : \sum C_1—C_5 \cdot 100$, % [Abrams, 2005, 2017], где $C_1—C_5$ — весовые концентрации УВ в долях на 1000.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

В связи с отсутствием глубокого бурения в ВСМ, основная информация о геологическом строении района исследований базируется на данных геологических съемок материкового и островного обрамления, геофизических исследований ОАО «Дальморнефтегеофизика» («ДМНГ»), Морской арктической геолого-разведочной экспедиции («МАГЭ») и ОАО «Севморгеология», а также результатах сейсморазведочных работ и бурения глубоких скважин в американском секторе Чукотского моря. Важным дополнением к материалам изучения кайнозойских отложений являлись данные бурения скважин № 1, А-1, Р, 240, 882, 21g, 22g и др. Геологические сведения о верхней части разреза получены в результате изучения керн донных осадков прибрежных мелких скважин (1Р, 2Р, 3, 4, 5, 6 и др.) и керноотборных трубок (рис. 1).

Стратиграфическая модель юго-восточной части ВСМ основывается на результатах анализа сейсмических профилей МОВ ОГТ (2D, «МАГЭ»), ES10 («ДМНГ»), 5АР («Севморгеология»), гравиметрических исследований, сопоставлении несогласий с разрезами материкового обрамления, о-вов Врангеля и Айон, данных сейсморазведочных работ и глубоких скважин, пробуренных в американском секторе Чукотского моря и северного склона Аляски [Thurston, Theiss, 1987; Sherwood et al., 1998, 2002]. Используемая в работе корреляция осадочного чехла американской и российской части Чукотского моря и ВСМ представлена в работах [Бурлин, Шипелькевич, 2006; Косько, 2007; Малышев и др., 2010; Петровская, Савишкина, 2014]. Работы, выполненные ОАО «МАГЭ», «ДМНГ» и «Севморгео» в последние годы, позволили выделить в разрезе района исследований допалеозойские образования и осадочный чехол на всю его мощность, что позволяет говорить не об условном горизонте под названием «акустический фундамент», а о геологической границе «чехол—фундамент» [Верба, 2016; Казанин и др., 2017].

Допалеозойские образования представлены верхней мантией, характеризующейся скоростью 7.9—8.1 км/с и плотностью 3.16—3.31 г/см³, базитовым слоем нижней коры (6.7—7.4 и 2.90—3.05) и диоритовым слоем верхней коры (5.9—6.5 км/с и 2.76—2.85 г/см³). Глубина залегания мантии изменяется от 20 до 38 км, базитового и диоритового слоев — от 5 до 30 и от 3 до 26 км. Залегающие выше архей-верхнепротерозойский гранитно-метаморфический слой верхней коры и супракрустальный рифей-вендский комплекс (рис. 2) характеризуются мощностями, достигающими 14—16 км, скоростями до 5.5 км/с и плотностью до 2.82 г/см³ [Ващилов, 1993; Геология., 2004; Цыганкова, 2005; Косько, 2007; Казанин и др., 2017]. Верхнепротерозойские образования врангелевского комплекса [Косько, 2007] сложены метавулканиками, метапесчаниками, сланцами и измененными карбонатными породами, включающими интрузивные тела гранитоидов и базитов.

Исследования «МАГЭ» [Казанин и др., 2017] позволили выделить в основании палеозойского осадочного чехла образования **кембрия, ордовика и силура**, сложенные песчаниками, сланцами, конгломератами и известняками (рис. 3), характеризующиеся скоростями до 4.5 км/с и мощностью 2—7 км в пределах прогибов Лонга и Северо-Врангелевского (см. рис. 2). В вышелегающих отложениях юго-восточной части ВСМ, по аналогии с американской частью Чукотского моря и Северной Аляски [Sherwood et al., 1998, 2002], выделяются пять структурно-стратиграфических сейсмокомплексов, разделенных между собой поверхностями региональных несогласий: нижнеэлсмирский, верхнеэлсмирский, рифтовый, нижнебрукский и верхнебрукский.

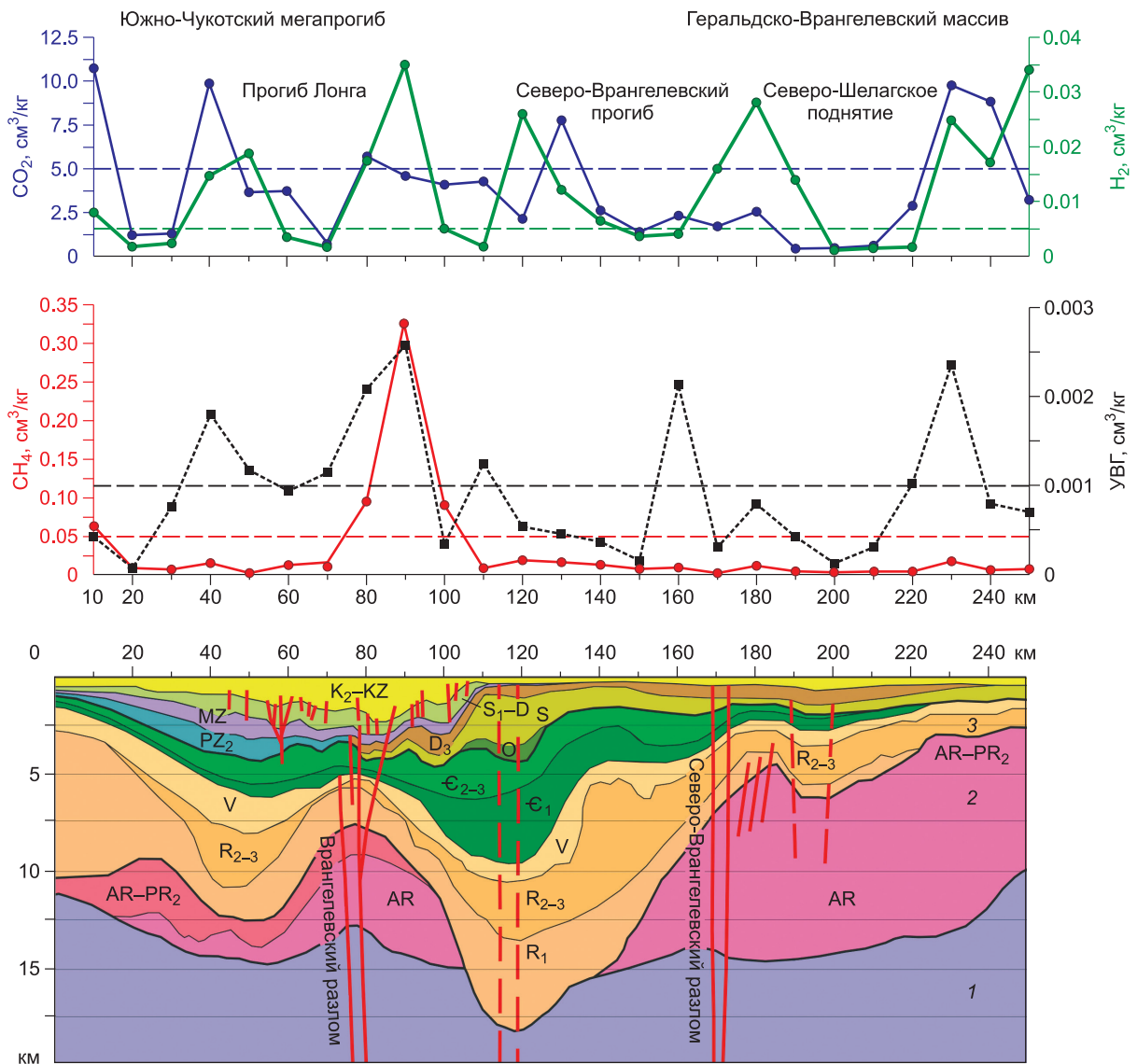


Рис. 2. Сейсмогеологический разрез Лонгского осадочного бассейна по профилю 5-AP [Казанин и др., 2017] с результатами определения газонасыщенности донных осадков [Гресов и др., 2017] с дополнениями:

1 — диоритовый слой верхней коры, 2 — гранитно-метаморфический слой, 3 — супракrustальный комплекс.

Нижнеэлсмрский (девон-среднепермский) комплекс, ограниченный EU и PU, сложен известково-кварц-полевошпатовыми песчаниками, известняками, алевролитами, аргиллитами, глинистыми сланцами и конгломератами общей мощностью до 3—5 км с плотностью пород 2.64—2.7 г/см³ и скоростями волн — 3.7—4.0 км/с.

Верхнеэлсмрский (верхнепермско-триас-нижнеюрский) комплекс представлен песчаниками, алевролитами, филлитами, глинистыми и углисто-глинистыми сланцами, конгломератами и интрузиями габбро-диабазов общей мощностью 3—6 км, плотностью пород — 2.62—2.68 г/см³ и скоростью волн — 3.4—3.6 км/с.

Образования **рифтового** (верхнеюрско-барремского) комплекса сложены алевролитами, аргиллитами, песчаниками, андезитами, дацитами, риолитами и их туфами общей мощностью до 2.5 км. На сейсморазрезах комплекс представлен непротяженными высокоамплитудными отражениями. Высокоамплитудные отражения связаны с пластами каменных углей. Пластовые скорости изменяются от 3.0 до 3.4 км/с, плотности пород — от 2.51 до 2.62 г/см³. Залегаящий выше нижний горизонт (подкомплекс) нижнебрукского комплекса соответствует фазе активного рифтогенеза, характеризующегося ступенча-

тым характером изменения мощностей осадков, контролируемых разломами. Подкомплекс идентифицируется в американской акватории данными бурения скважин и прослеживается к западу в российской части Чукотского моря и ВСМ, что дает основание полагать о синхронности развития и сходстве строения этих площадей.

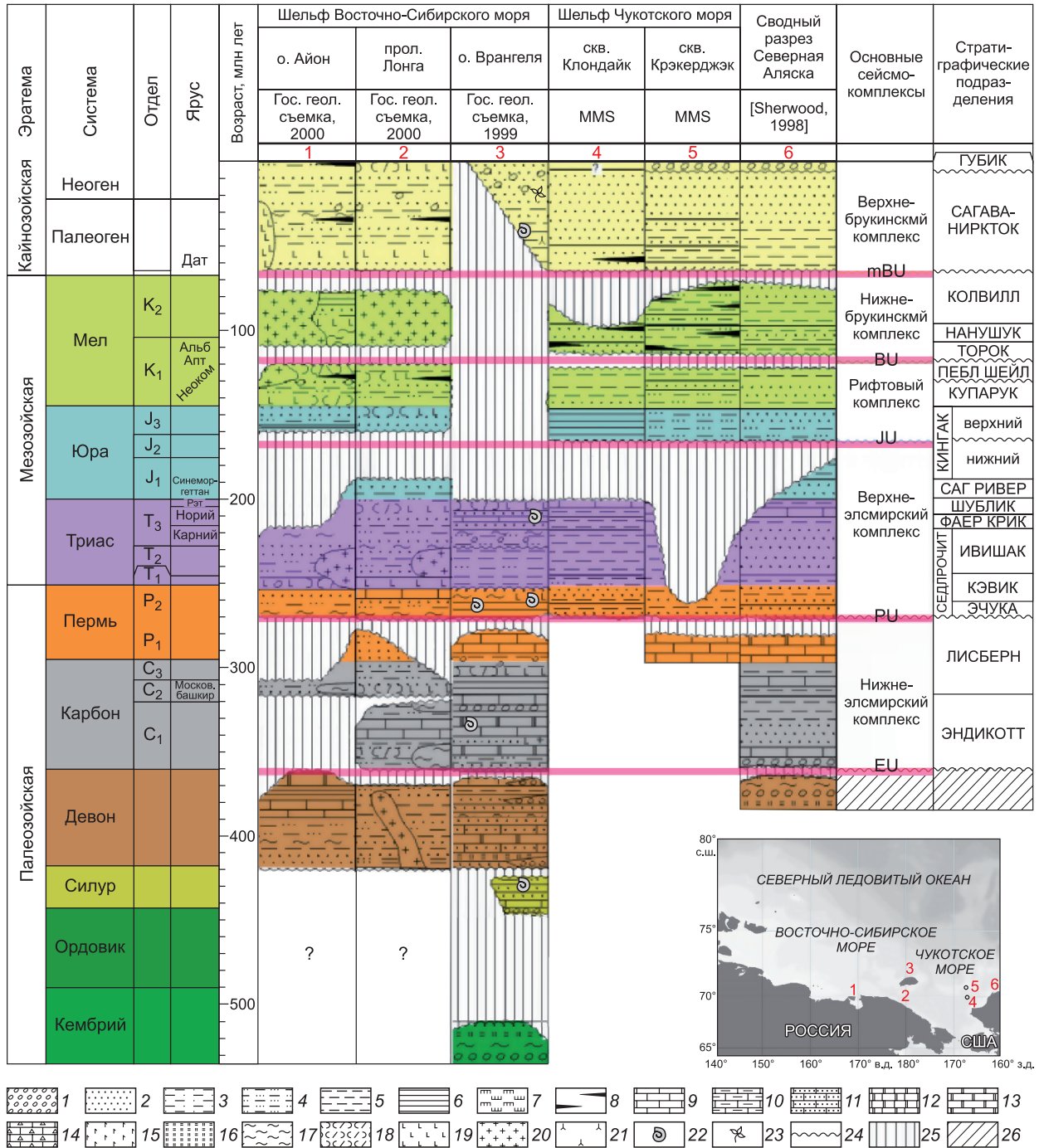


Рис. 3. Межрегиональная стратиграфическая корреляция палеозой-кайнозойских отложений шельфа восточной Арктики и Северной Аляски [Малышев и др., 2010].

1 — конгломераты; 2 — пески, песчаники; 3 — алевроиты, суглинки; 4 — алевролиты; 5 — глины; 6 — аргиллиты; 7 — кремне-содержащие породы; 8 — уголь; 9 — известняк; 10 — известняк глинистый; 11 — песчаник известковистый; 12 — известняк доломитизированный; 13 — доломит; 14 — известковая брекчия; 15 — гипс; 16 — кварциты; 17 — филлиты; 18 — туф риолитовый; 19 — базальт; 20 — гранитоиды; 21 — спиккулы губок; 22 — обломки раковин; 23 — палинофлора; 24 — стратиграфическое несогласие; 25 — отсутствие отложений; 26 — акустический фундамент.

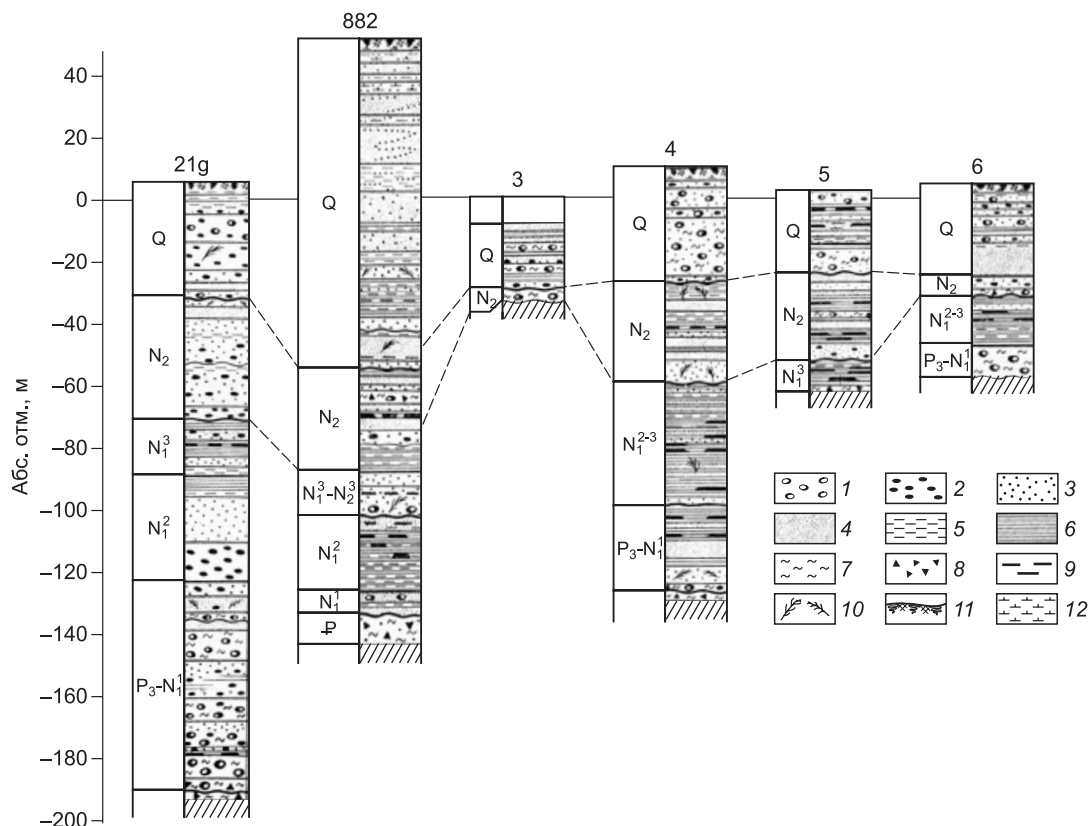


Рис. 4. Литологический состав неогеновых и четвертичных отложений о. Малый Роутан (скв. 882), губы Нольде (скв. 3), побережья Чаунской губы (скв. 21g) и прол. Лонга (скв. 4, 5, 6), по данным [Безродных, 1983].

1 — галечники, 2 — гравий, 3 — пески крупнозернистые, 4 — пески мелкосреднезернистые, 5 — алевриты, 6 — илы пелитовые, 7 — глины, 8 — щебень, 9 — прослои и пласты торфа, лигнитов и бурых углей, 10 — рассеянные растительные остатки, 11 — почвенный слой, 12 — лед. Расположение скважин см. на рис. 1.

Нижнебрукский (апт-верхнемеловой) комплекс сложен аргиллитами, песчаниками, алевролитами, филлитами, риолитами, дацитами, андезитами и их туфами общей мощностью 1.5—2.5 км [Вашилов, 1993; Геология..., 2004; Виноградов и др., 2004; Цыганкова, 2005; Косьюко, 2007; Малышев и др., 2010; Исханов, 2014; Петровская, Савишкина, 2014; Дараган-Сушова и др., 2015; Государственная..., 1999, 2016 б].

Верхнебрукский (кайнозойский) комплекс представлен бассейновыми палеоцен-четвертичными отложениями. Образования *нижнего палеоцена* сложены базальтами и их туфами, песчаниками, алевролитами, аргиллитами и конгломератами; *средне-нижнего палеоцена* и *нижнего эоцена* — песчаниками, алевролитами, конгломератами, аргиллитами, песками, алевритами, глинами, пластами бурого угля. Отложения *среднего* и *нижнего эоцена* представлены песчаниками, алевролитами, песками с прослоями алевритов, *олигоцена* — переслаиванием песчаников, алевролитов, аргиллитов, песков, глин, алевритов, пропластков и пластов бурых углей (рис. 4). Палеогеновые отложения характеризуются протяженными малоамплитудными отражениями в нижней части разреза и высокоамплитудными — в верхней. Пластовые скорости при этом варьирует от 2.5 до 3.0 км/с. Мощность палеогеновых отложений изменяется от 50 до 1800 м.

Миоценовые отложения, представленные переслаиванием песков, алевритов, глин, многочисленных пропластков, пластов бурых углей и лигнитов, характеризуются протяженными высокоамплитудными отражениями со скоростями 2.1—2.4 км/с. *Плиоценовые* осадки сложены галечниками, гравийниками, песками с прослоями алевритов, лигнитов и торфов. Отложения представлены протяженными малоамплитудными отражениями со скоростями до 2.0 км/с. Мощность неогеновых отложений изменяется от 30 до 900 м. *Четвертичные* осадки представлены отложениями плейстоцена и голоцена. Аллювиальные отложения *плейстоцена* сложены песками с гравием, галькой, прослоями алевритов и линзовидными прослоями песка, гравия и торфа. Аллювиально-пролювиальные маломощные (1—3 м) плохо

сортированные алевриты, пески, глины со щебнем и галькой установлены в пределах островного побережья. Озерно-аллювиальные отложения вскрыты скважинами на о-вах Айон, Большой Роутан, прол. Лонга и на побережье района исследований. На островах и в проливах преобладают разнородные пески с прослоями гравия, алевриты и глины с линзами торфа (до 0.7 м), растительными остатками и обломками лигнитизированной древесины. *Голоценовые* осадки представлены алевритами, глинистыми алевритами и галечниками с прослоями песков с растительными остатками и обломками углей мощностью до 10 м. Общая мощность четвертичных осадков не превышает 200 м [Сухоруслов, 1978; Безродных, 1983; Иванов, 1985; Сдободин и др., 1990; Государственная..., 1999, 2016б; Геология..., 2003, 2004; Фандюшкин, 2006; Косько, 2007; Гусев и др., 2009; Малышев и др., 2010; Шакиров и др., 2013; Исханов, 2014; Петровская, Савишкина, 2014; Дараган-Суцова и др., 2015].

Тектоника. Исследуемая площадь ВСМ рассматривается как самостоятельная зона перехода от континентального орогенного обрамления к окраинно-материковой плите, представленная двумя структурно-тектоническими этажами. Нижний этаж сложен сложнодислоцированными терригенными отложениями Новосибирско-Чукотской области мезозойской складчатости, прорванными телами магматических образований. Верхний этаж представлен платформенными осадочными отложениями кайнозоя, выполняющими тектонические депрессии [Государственная..., 2016б].

В результате складчатых движений среднеюрского времени в районе исследований формируются основные синклинальные и антиклинальные зоны, сопровождающиеся образованием разломов. Посторогенный коллапс Новосибирско-Чукотской складчатой системы, испытавшей максимальные деформации сжатия в позднеюрско-раннемеловой этап, явился основной причиной формирования Айонского, Пегтымельского и Лонгского осадочных бассейнов в пределах Пегтымельского, Дремхедского, Раучуанского и Южно-Чукотского прогибов. В структурно-тектоническом отношении осадочные бассейны юго-восточной части ВСМ представлены впадинами наложенно-унаследованных рифтогенных прогибов Новосибирско-Чукотской области мезозойской складчатости, аналогами которых являются бассейны Чукотского моря типа «pull-apart». В основании бассейнов развиты многочисленные сбросовые структуры (см. рис. 2). В некоторых частях фундамента прослеживаются комплексы пород, развивавшиеся в условиях как постколлизиионного растяжения, так и сдвиговых деформаций, в том числе типа «рор-ур». Сдвиги, как правило, произошли по реактивированным разломам нижнего структурного комплекса и фундамента, но в ряде случаев они являются новообразованными и секут более ранние разломы. Подобными процессами был охвачен весь Восточно-Арктический сегмент, о чем свидетельствует широкое развитие блоковых присдвиговых структур растяжения в пределах шельфов морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского, а также прилегающей суши. Все эти события были связаны с раскрытием Евразийского бассейна и фазами плитотектонических перестроек в ходе общей геодинамической эволюции арктического региона. Плиоцен-четвертичный этап развития района исследований происходил в обстановках относительно спокойного погружения региона в целом [Thurston, Theiss, 1987; Грамберг и др., 1997; Drachev et al., 1998; Franke et al., 2004; Виноградов и др., 2004; Геология..., 2004; Косько, 2007; Verzhbitsky et al., 2012].

Среди наиболее крупных нарушений выделяются структурообразующие Шелагский, Врангелевский, Нейтлин-Наглейненский глубинные разломы широтного простирания и Северо-Врангелевский, Чаунский, Северо-Чаунский, Северо-Айонский и Восточно-Раучуанский — меридионального и субмеридионального простирания (см. рис. 1).

Северо-Айонский глубинный разлом разделяет Айонский бассейн на две структуры — одноименную впадину и поднятие (горст), имеющим разный характер гравитационных полей. Глубина его заложения, по данным гравиметрической съемки, составляет 67 км. Чаунский трансформный, Восточно-Раучуанский и Северо-Чаунский разломы выходят на шельф с суши с глубиной заложения не менее 36 км. Врангелевский и Шелагский разломы, оконтуривающие побережье восточной половины рассматриваемой акватории и о. Врангеля (Лонгского бассейна), имеют глубину заложения 36—40 км. Северо-Врангелевская система субмеридиональных разрывов с глубиной заложения не менее 40 км [Вашилов, 1993; Цыганкова, 2005] уходит от о. Врангеля в северо-восточном направлении (см. рис. 1).

Формирование Геральдско-Врангелевского массива (Северо-Шелагского поднятия) и надвиговочешуйчатых форм на о. Врангеля происходило в процессе перемещения огромной массы пород с юго-запада на северо-восток, вызванном среднеюрским орогенезом, охватившим северную часть Чукотского полуострова и п-ова Аляска. Впоследствии складчатые структуры поднятия вплоть до настоящего времени также испытывали неоднократный подъем, подвергаясь при этом интенсивной эрозии и, соответственно, представляли зону активного размыва [Грамберг и др., 1997; Государственная..., 1999, 2016б; Геология..., 2003, 2004; Косько, 2007; Малышев и др., 2010; Исханов, 2014].

Магматические образования района исследований включают разновозрастные интрузивные, субвулканические и дайковые тела — от кислых до основных и щелочных. В триасовых отложениях имеют распространение габбро-диабазы, гранитоиды, риолиты и их туфы. Раннемеловой магнетизм

объединяет интрузии гранодиорит-порфиров и субвулканические тела андезитовых порфиров. Ранне- и позднемеловой магнетизм представлен субвулканическими и дайковыми телами кварцевых порфиров, липаритодацитов, диоритовых порфиритов, гранодиорит-порфиров и гранит-порфиров. Позднемеловой магнетизм присутствует в виде субвулканических жил и даек биотитовых, биотит-рогообманковых и пироксеновых андезитов и андезибазальтов. Интенсивное развитие магматической и вулканической деятельности в юго-восточном секторе Восточно-Сибирского моря и прилегающей части его побережья в апт-альбский период связано с процессами формирования Охотско-Чукотского вулканогенного пояса, расположенного в непосредственной близости от района исследований.

Структуры тектономагматической активизации, представленные вулканическими поднятиями, интрузивно-купольными и линейно-поясовыми дайковыми телами, связаны с формированием плутонических комплексов, а также с разломами, контролирующими становление как вулканических, так и интрузивных образований [Угольная..., 1999; Государственная..., 1999, 2016б; Геология..., 2004; Катков и др., 2007; Miller, Verzhbitsky, 2009].

Угленосность и органическая насыщенность отложений. К наиболее древним угленосным отложениям относятся породы норийского и карнийского ярусов, в которых установлены углистые сланцы с содержанием $C_{орг.}$ до 29 % и прослой каменных углей — до 87 %. В пределах о. Врангеля и материкового обрамления установлена битуминозность верхнетриасовых и нижнемеловых пород (см. рис. 1). Содержание битумоида находится в тесном соответствии с содержанием органического вещества (ОВ) — от долей до первых единиц процента. В групповом составе битумов (антраксолитов) преобладают смолы, асфальтены и ароматические фракции [Клубов, 1983; Флюидогеодинамика..., 1989].

Обилие растительных остатков в породах неокома предопределяет гумусовый состав ОВ (III тип керогена), содержание которого типично для угленосных молассовых формаций Северо-Востока России — от первых процентов в породах до 80—90 % в пластах угля. В пределах материкового обрамления Лонгского бассейна в нижнемеловой кукевеевской свите одноименной угленосной площади содержится 8—12 пластов каменных углей стадий катагенеза MK_5 — AK_1 мощностью 1.4—4.0 м. Аналогами нижнемеловых углей Айонского и Пегтымельского бассейнов, по-видимому, являются угли Анюйского и Анжуйского угольных бассейнов, в айнахкургенской и балыктахской свитах которых установлено до девяти пластов каменных углей стадий MK_1 — MK_2 мощностью 1.2—25.0 м [Угольная..., 1999; Государственная..., 1999, 2016б, в; Фандюшкин, 2006; Гресов, 2012, 2014].

В палеогеновых отложениях установлены пропластки и пласты бурого угля (стадий катагенеза PK_1 — PK_2) мощностью от 0.1 до 2.0 м с содержанием $C_{орг.}$ 67—70 %. Флористический состав угленосного комплекса имеет наибольшее сходство со спорово-пыльцевыми комплексами бурогоугольной формации Анжуйского угольного бассейна (Новосибирских островов). Максимальной угленасыщенностью характеризуются отложения неогена, в которых сосредоточены многочисленные линзы, пропластки и пласты бурых углей стадии PK_1 мощностью до 6—8 м с содержанием $C_{орг.}$ 63—65 %. В верхней части разреза установлены пласты лигнитов мощностью до 1.8 м, содержание $C_{орг.}$ в которых в среднем составляет 61 %. В плейстоценовых осадках установлены пласты торфов мощностью до 2 м. Концентрации $C_{орг.}$ в донных осадках изменяются от 0.3 до 3.4 %, бескарбонатных разностей — от 0.03 до 0.12 %. Среднее содержание $C_{орг.}$ в осадках Пегтымельского бассейна составляет 1.2 %, Лонгского — 1.5, Айонского — 1.7 % [Безродных, 1983; Иванов, 1985; Сдободин и др.; 1990; Геология..., 2003, 2004; Фандюшкин, 2006; Шакиров и др., 2013; Астахов и др., 2013; Гресов и др., 2017].

Геокриологические условия. В процессе морских экспедиционных работ (рейсы НИС «Академик Лаврентьев» — LV-45, LV-77) установлено, что температуры донных осадков на площади Лонгского и Пегтымельского бассейнов характеризуются преимущественно отрицательными значениями, что обусловлено развитием зоны многолетнемерзлых пород (ММП), мощность которой, по данным бурения, на побережье ВСМ составляет 60—120 м, на глубинах моря свыше 4 м — 2.8—25 м. Наряду с этим, в пределах Геральдско-Врангелевского массива (см. рис. 1, 2, станции 240—290), Пегтымельского прогиба (ст. 14), северного крыла Лонгского прогиба (ст. 10—20, 90—110) и Чаунской впадины наблюдаются участки донных отложений с температурами +0.1...+1.9 °С. Зона ММП в последней распространена вдоль берегов полосой от нескольких сотен метров до первых десятков километров [Жигарев, 1981; Геология..., 2003, 2004; Государственная..., 2016 в].

РЕЗУЛЬТАТЫ ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В составе газа пород, газопроявлений и донных осадков района исследований установлены: УВГ (CH_4 , C_2 — C_5 и их непердельные гомологи), CO_2 , H_2 , He, N_2 и Ar, в редких случаях CO и H_2S .

Углеводородные газы (УВГ) газопроявлений из скважин и водных источников побережья представлены метаном (до 77.5 %), этаном (до 0.71), пропаном (до 0.14) и бутаном (до 0.06 %). Суммарная концентрация гомологов метана не превышала 0.87 %, удельное выделение газа — 10 м³/сут [Никитин и др., 1985; Флюидогеодинамика..., 1989; Гресов, 2012, 2014; Гресов и др., 2017].

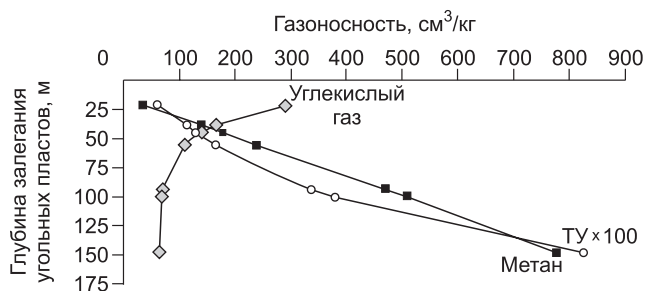


Рис. 5. Изменение газоносности лигнитов и бурых углей Чаунской впадины в зависимости от глубины их залегания.

Метаносность каменных углей Кукевеевской угленосной площади на горизонте 50 м в среднем составляет 380 см³/кг, 100 м — 1270, 150 м — 2480, 300 м — 8720 см³/кг [Гресов, 2014].

Концентрации **метана** в четвертичных осадках и торфяниках материкового и островного обрамления изменяются в пределах 0.03—0.55 и 1.12—1.25 % (0.003—0.05 и 3.6—4.1 см³/кг), эффузивных породах — 0.34—1.6 (0.6—3.3), песчаниках — 3.91—4.04 (7.1—10.3), лигнитах и углях — 2.4—40.4 % (23—780 см³/кг) в интервале опробования 21—148 м. Содержание этана в четвертичных осадках и торфяниках достигает 0.0004 и 0.0074 % (0.00003 и 0.024 см³/кг), эффузивных породах — 0.0144 (0.029), песчаниках — 0.0234 (0.04), лигнитах и углях — 0.13 и 0.33 % (1.5—6.1 см³/кг). Аналогично для пропана: 0.00001 и 0.0013 % (0.00001 и 0.005 см³/кг), 0.0031 (0.007), 0.0038 (0.009), 0.037 и 0.075 % (0.16 и 1.39 см³/кг). Концентрации бутана в торфяниках не превышают 0.00006 % (0.008 см³/кг), эффузивах — 0.00093 (0.00002), песчаниках — 0.0019 (0.005), лигнитах и бурых углях — 0.019 и 0.042 % (0.08 и 0.78 см³/кг). В пробах газа, отобранных из углей, присутствует пентан в содержаниях до 0.00017 % (0.003 см³/кг). В целом концентрации метана и его гомологов в пластах бурых углей достигают 780 и 8.2 см³/кг на глубинах 140—150 м. Угленосные отложения до указанных глубин находятся в зоне газового выветривания (CH₄ < 80 %), горизонты полной деметанизации отсутствуют, концентрации CH₄ до 0.1 % фиксируются на глубинах 1—5 м. С увеличением глубины залегания угольных пластов концентрации метана и его гомологов закономерно возрастают, а углекислого газа снижаются (рис. 5).

Установлено, что все литотипы (источники газа, табл. 1) характеризуются индивидуальными газогеохимическими показателями. Изотопный состав углерода метана четвертичных отложений и торфяников изменяется от –78.0 до –90.4 ‰, что указывает на биохимическую природу его образования. Показатели δ¹³C метана лигнитов и бурых углей изменяются от –57.4 до –74.8 ‰, что предполагает на наличие в УВГ метаморфогенной составляющей, доминирование которой наблюдается в каменных углях Кукевеевской угленосной площади (в среднем –49.8 ‰). Изотопный состав углерода метана газопроявлений –58.7...–70.4 ‰ указывает на полигенезисный характер его образования. Наиболее «тяжелые» показатели δ¹³C CH₄ (–27.3...–32.4 ‰) установлены в магматических породах побережья ВСМ [Гресов, 2012, 2014; Гресов и др., 2016, 2017].

В процессе исследований установлено, что в донных осадках присутствуют сингенетические УВГ современных осадков и эпигенетические — торфяников, лигнитов, бурых углей, газовых скоплений и залежей кайнозойского возраста, мезозойских угольных залежей, битумов (?), магматических образований, а также предполагаемых конденсатно-газовых, газоконденсатных, нефтегазовых и газонефтяных залежей, близких по значениям к аналогам Ленского, Анадырского и Сахалинского углефтегазонос-

Таблица 1. Геохимические показатели УВГ материкового обрамления района исследований

Источник газа	Весовые концентрации в долях целого на 1000*					M _{УВ} *, г/моль	Геохимический коэффициент*		
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅		1	2	3
Четвертичные отложения (19)	999	1	Сл.	0	0	16.05	0.1	0.1	898
Торфяники (6)	991	7	2	0	0	16.12	0.4	0.9	110
Скопления свободного газа (8)	989	7	3	1	0	16.15	3.0	1.1	90
Лигниты (21)	985	10	4	1	0	16.17	2.5	1.0	66
Бурые угли (24)	981	14	3	2	Сл.	16.19	9.3	1.9	52
Каменные угли (6)	967	22	7	3	1	16.34	11.6	3.4	29
Магматические породы (6)	939	40	15	6	0	16.58	16.6	6.5	15
Твердые битумы (2)	856	53	40	47	4	17.55	64.1	16.8	6

Примечание. В скобках — количество проб газа. C₁—C₅ — метан и его гомологи. M_{УВ} — молекулярная масса УВ фракции. Геохимические коэффициенты: 1 — преобразованности УВ фракции, K_{пр}; 2 — «влажности», K_{вл}; 3 — «сухости», K_{сух}.

* Средние значения.

Таблица 2. Средние показатели газонасыщенности и изотопного состава $\delta^{13}\text{C}$ в донных осадках

Газоматеринский источник (генетическая группа)	Газонасыщенность, см ³ /кг					$\delta^{13}\text{C}$, ‰		
	CO ₂	CH ₄	УВГ	H ₂	He	CH ₄	C ₂ H ₆	CO ₂
I. Современные осадки (12)	3.4	0.019	0.0001	0.001	0.0001	-85.0	Н.о	-39.9
II. Торфяники (12)	4.1	0.034	0.0001	0.003	Н.о	-79.8	»	-38.8
III. Лигниты (9)	6.5	0,048	0.0002	Н.о	»	-70.8	»	-32.4
IV. Угольные залежи (42):	9.6	0.356	0.0044	0.022	0.0042	-58.4	-29.1	-24.4
бурые угли (27)	10.4	0.294	0.0030	0.029	0.0033	-60.0	-29.1	-25.5
каменные угли (15)	8.1	0.469	0.0069	0.015	0.0052	-56.0	Н.о	-22.0
V. Газовые скопления и залежи (24)	2.2	0.030	0.0003	0.025	Н.о	-61.3	»	-28.2
кайнозойского возраста (15)	1.9	0.036	0.0002	0.025	»	-61.3	-31.8	-28.2
мезозойского возраста (9)*	2.7	0.020	0.0003	Н.о	»	Н.о	Н.о	Н.о
VI. Магматические породы (18)	12.6	0.014	0.0003	0.090	0.0108	-27.5	»	-17.1
VII. Твердые битумы (6)*?	2.9	0.014	0.0011	0.034	0.020	-41.6	»	Н.о
VIII. Конденсатно-газовые скопления и залежи (21)*	3.4	0.039	0.0019	0.012	0.0039	-39.5	»	-19.8
IX. Газоконденсатные скопления и залежи (9)*	4.4	0.015	0.0021	0.004	0.0031	-43.8	-26.1	-21.6
X. Нефтегазовые скопления и залежи (21)*	2.8	0.008	0.0012	0.046	0.0099	-43.3	-24.6	-20.8
XI. Газонефтяные скопления и залежи (18)*	4.5	0.012	0.0036	0.019	0.0124	-38.8	-17.0	-20.6

Примечание. Изотопный анализ выполнен в лабораториях стабильных изотопов Московского геолого-разведочного института, Дальневосточного геологического института ДВО РАН и Университета Хоккайдо на масс-спектрометрах Finnegan MAT-350, Delta plus XL и GC Combustion III [Шакиров и др., 2013; Гресов и др., 2016, 2017]. Н.о — не определялся.

* Предполагаемые залежи.

ных бассейнов [Гресов, 2011, 2012, 2014]. При этом указанные газоматеринские источники характеризуются индивидуальными геохимическими показателями (табл. 2, 3).

Исходя из значений $\delta^{13}\text{C}$ CH₄, C₂H₆ и значений газогеохимических показателей (см. табл. 2, 3), газы современных осадков являются биохимогенными. В миграционных газах торфяников и лигнитов также доминирует биохимогенная составляющая. Газы этих генетических групп представляют начальную стадию углегазообразования с доминированием процессов окисления ОВ. Газы кайнозойских газовых скоплений и залежей характеризуются полигенезисным составом. Газы твердых битумов, угольных, газовых и предполагаемых конденсатно-газовых, газоконденсатных, нефтегазовых, газонефтяных залежей относятся к метаморфогенным, магматическим образований — к магматогенным.

Максимальными концентрациями метана характеризуются участки осадков на площадях развития угольных залежей (в среднем 0.36 см³/кг, см. табл. 2), минимальными — магматических пород, битумов и предполагаемых газонефтяных, нефтегазовых залежей (в среднем 0.01). Промежуточное положение (в среднем 0.02—0.04 см³/кг) занимают участки донных осадков, характеризующиеся газогеохимическими показателями торфяников, лигнитов, газовых и предполагаемых газоконденсатных, конденсатно-газовых залежей.

Содержания этана и этилена (в сумме) в осадках достигают 0.007 %, пропана и пропилена — 0.0015, *n*-бутана и *i*-бутана — 0.0017, *i*-пентана — 0.00014 %. Максимальными концентрациями гомологов метана (суммарно по гомологам метана до 0.03 см³/кг) характеризуются участки осадков на площадях развития угольных и предполагаемых газонефтяных залежей, минимальными — современных осадков, торфяников, лигнитов и магматических пород (в среднем 0.001—0.003 см³/кг). Промежуточное положение занимают участки, характеризующиеся газогеохимическими показателями газовых и предполагаемых нефтегазовых, газоконденсатных, конденсатно-газовых скоплений и залежей (см. табл. 2).

В процессе исследований установлены участки донных осадков с аномальными концентрациями CO₂, CH₄ и УВГ, H₂ и He, превышающие 5, 0.05 и 0.001, 0.005 и 0.005 см³/кг соответственно [Яшин, Ким, 2007; Гресов и др., 2017].

Аномальные концентрации метана в донных осадках зафиксированы на площадях развития углегазоносных формаций и газовых залежей Чаунской, Айонской впадин и крыльев впадины Лонга, в пределах приразломных зон Северо-Айонского, Чаунского, Шелагского и Врангелевского разломов. Аналогичная ситуация наблюдается на участках с положительными температурами осадков (таликов), являющимися зонами газовой разгрузки. Аномальными показателями также характеризуются площади развития предполагаемых конденсатно-газовых залежей северного крыла прогиба Лонга (ст. 80) и Ай-

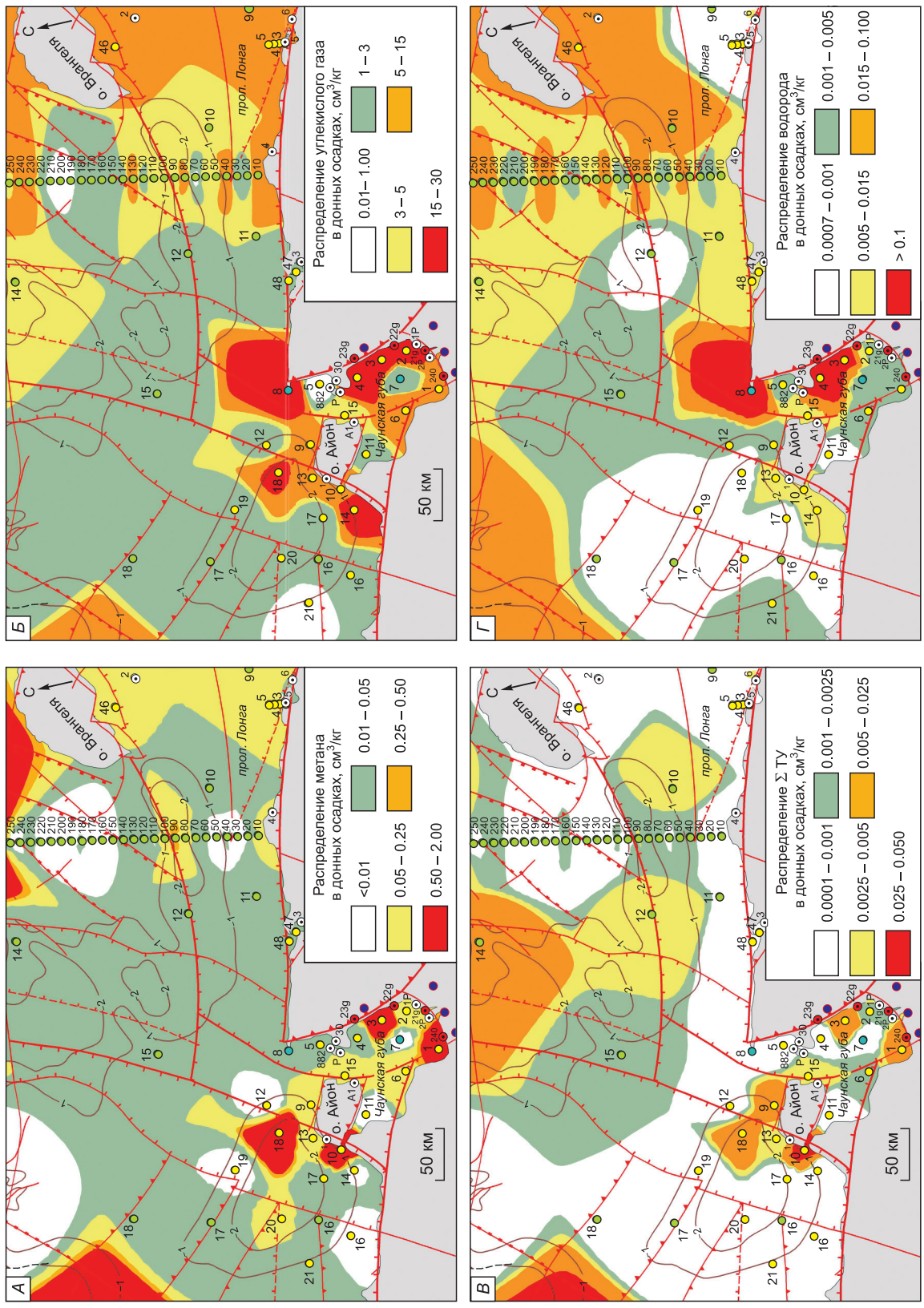


Рис. 6. Распределение газонасыщенности донных отложений района исследований.

A — CH_4 , B — CO_2 , B — УВГ , Г — H_2 .

онской впадины (ст. 9, 13). Это же относится к площади развития предполагаемой нефтегазовой залежи Айонской впадины (ст. 18, рис. 6, А).

Специфической особенностью Пегтымельского и Лонгского бассейнов является формирование аномальных концентраций гомологов метана в донных отложениях на большей части их площади (см. рис. 6, В). В Айонском бассейне аномальные показатели установлены в приразломных зонах Северо-Айонского, Северо-Чаунского и Чаунского разломов. Аномальные концентрации также отмечаются на площадях развития углей и предполагаемых конденсатно-газовых, газоконденсатных и газонефтяных залежей.

Содержания **углекислого газа** в четвертичных осадках и торфяниках в среднем составляют 1.2 и 21.8 % (3.6 и 136.8 см³/кг), эффузивных породах — 32.8 (157.2), песчаниках — 7.79 (68.1), углей и лигнитов — 11.9 и 21.4 % (148.4—283.4 см³/кг) в интервале опробования 21—148 м (см. рис. 5). Показатели $\delta^{13}\text{C}$ биохимического CO₂ четвертичных отложений и торфяников изменяются в пределах -38.8...-50.9 ‰, биометаморфогенного — лигнитов и бурых углей от -23.7 до -32.4, метаморфогенного — каменных углей -21.8, магматогенного — эффузивных пород -15.4...-18.4 ‰ [Гресов и др., 2017].

Содержание углекислого газа в донных осадках района исследований изменяется от 0.4 до 8.9 % (0.5—29.2 см³/кг). Средние значения концентраций и изотопного состава углерода CO₂ приведены в табл. 2. Аномальные концентрации CO₂ в донных осадках Айонского бассейна, Шелагского, Врангелевского и Северо-Шелагского поднятий (рис. 6, Б) наблюдаются на площадях развития магматических образований и зон глубинных разломов (21—29 см³/кг), лигнитов (7—15) и пластов бурого угля (15—19 см³/кг).

Содержание **водорода** в геологических образованиях материкового и островного обрамления достигает 1.4 %. Концентрации H₂ в четвертичных осадках не превышают 0.0002 % (0.003 см³/кг), в лигнитах и бурых углях — 0.02 и 0.07 (0.3 и 1.6), песчаниках — 0.14 (0.8) и эффузивах — 1.4 % (4.2 см³/кг). Содержание H₂ в донных осадках изменяется в пределах 0.0001—0.07 % (0.001—0.19 см³/кг). Максимальные концентрации водорода (до 0.12—0.19 см³/кг) установлены на площадях развития магматических пород Шелагского поднятия и Чаунской впадины в зонах одноименных глубинных разломов (см. рис. 1, рис. 6, Г). Формирование аномальных концентраций H₂ в донных осадках (до 0.034 см³/кг) Врангелевского и Северо-Шелагского поднятий, Лонгского и Северо-Врангелевского прогибов контролируется поднятиями архей-протерозойского фундамента и рифей-вендского супракрустального комплекса в зонах дислокации разломов и тектонических нарушений (см. рис. 2, рис. 6, Г). Обращает внимание сходство распределения водородных и углекислотных газогеохимических полей района исследований (см. рис. 6, Б, Г), формирование которых, по-видимому, обусловлено процессами миграции H₂ и CO₂ из общих газоматеринских источников. Концентрация водорода в осадках на площадях развития угольных пластов достигает 0.12 см³/кг, предполагаемых конденсатно-газовых и нефтегазовых скоплений и залежей — 0.05—0.015 см³/кг. Природа водорода в донных осадках миграционная. Часть водорода, возможно, образовалась в донных отложениях в процессе биохимических реакций [Гресов и др., 2017].

Содержание **гелия** в бурых углях материкового обрамления не превышает 0.0004 % (0.001 см³/кг). Аномальные концентрации гелия 0.012—0.025 см³/кг установлены в донных осадках Геральдско-Врангелевского массива, крыльях впадины Лонга (0.012—0.014) и зонах Врангелевского, Северо-Айонского, Чаунского разломов (0.009—0.035). Средними значениями (> 0.01 см³/кг) характеризуются площади развития магматических пород, твердых битумов и предполагаемых газонефтяных скоплений и залежей (см. табл. 2). Гелий относится к радиогенному типу миграционных газов, образовавшихся в процессе радиоактивного распада на больших глубинах и поступающих в верхние слои литосферы по зонам разломов.

Оксид углерода эпизодически отмечался в донных осадках района исследований в зонах развития магматических пород и глубинных разломов. Содержание CO не превышало 0.00014 %, генетическая природа в осадках миграционная. В Чаунской впадине оксид углерода присутствует в составе магматических пород побережья в концентрациях до 0.005 % (0.017 см³/кг) [Гресов, 2012; Гресов и др., 2017]. Содержание **азота** и **аргона** в донных осадках изменяется в пределах 72.7—95.5 и 0.12—0.46 %. Часть Ar и N₂ характеризуется воздушным происхождением, другая — глубинным. В донных осадках Айонского бассейна и Северо-Шелагского поднятия эпизодически фиксировался сероводород в концентрациях до 0.0048 % (0.014 см³/кг), генезис которого, по-видимому, связан с биохимическими реакциями [Гресов и др., 2017].

ВЛИЯНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Основными геологическими факторами, влияющими на формирование и распределение газонасыщенности донных осадков юго-восточного сектора Восточно-Сибирского моря, являются: история геологического развития, тектоника, магматизм, литологический состав и катагенез осадочных пород, геокриологические условия, угленосность и нефтегазонасыщенность.

История геологического развития. Основные этапы эрозии и дегазации породного комплекса района исследований обусловлены характером орогенических фаз складчатости. С положительными

формами движениями земной коры связаны процессы интенсивной дегазации и максимального подтока глубинных газов к поверхности. Данные процессы, по-видимому, определяют формирование аномальной газонасыщенности донных осадков в пределах поднятий верхней коры в Лонгском (см. рис. 2) и Айонском бассейнах. Купольные поднятия верхней части коры, поднимаясь до глубин 10 км, влияют на процессы миграции газов и развитие в осадках аномальных газогеохимических полей Шелагского, Врангелевского, Айонского и других поднятий. С отрицательными формами движениями земной коры связано перекрытие отложений более молодыми осадками, замедление процессов дегазации, восстановление и возрастание концентраций газов в ранее дегазированных отложениях до средних и аномальных значений в Айонском и Лонгском бассейне (см. рис. 2, 6). Развитие аналогичных процессов предполагается и в слабоизученном Пегтымельском бассейне.

Тектонический фактор. Тектоническое строение фундамента впадин и поднятий юго-восточной части ВСМ имеет важное значение в формировании и распределении газонасыщенности донных осадков. Поскольку условия миграции газов в *антиклинальных* и *синклинальных* складках палеозой-мезозойского фундамента не одинаковы, характер распределения газонасыщенности отложений в этих складках различный. В осадочных бассейнах максимальной дегазацией и миграцией газов характеризуются крылья синклиналей. С увеличением углов падения крыльев и замыкания складок в осадочных бассейнах наблюдается возрастание интенсивности миграции газов и формирование в осадках аномальных концентраций CH_4 , УВГ, H_2 , максимум которых отмечается в зонах выходов палеогеновых отложений под четвертичные осадки. В антиклинальных складках максимальная миграция газов наблюдается в центральных сводовых дислоцированных структурах поднятий, в донных осадках которых наблюдаются аномальные концентрации H_2 , He, CO_2 , CH_4 и УВГ (см. рис. 2, 6). *Моноклинальные* складки района исследований обычно представлены средними значениями газонасыщенности донных осадков, редко — аномальными, приуроченными к зонам тектонических нарушений фундамента.

Дизъюнктивные нарушения в зависимости от степени их газопроницаемости являются как путями миграции газов, так и экранами, способствующими накоплению газов в мезозойских породных комплексах фундамента бассейнов. Газопроницаемость нарушений определяется его типом, амплитудой, углом падения сместителя, мощностью зоны дробления и литологическим составом пород в зоне дробления. *Продольные* простирания пород нарушения (широтного простирания) благоприятствуют процессам сохранения и накопления газов в породах фундамента, *поперечные* (меридионального простирания) — процессам их дегазации и миграции газов в кайнозойские отложения. Нарушения данного типа способствуют формированию аномальной газонасыщенности донных осадков геоструктур района исследований. Функциональная роль *диагональных* нарушений зависит от изменения углов их простирания и газопроницаемости (см. рис. 6).

В результате магматической деятельности в породы мезозойского фундамента бассейнов привнесено значительное количество магматогенных газов, в том числе CO_2 , CO, H_2 и др. Внедрение интрузий сопровождалось формированием нарушений и зон трещиноватости, являющимися не только путями миграции, но и трещинными коллекторами газов. На площадях развития магматических образований и глубинных разломов Чаунской впадины, Шелагинского и Врангелевского поднятий в осадках наблюдается формирование аномальных углекислотно-водородных газогеохимических полей (см. рис. 6, Б, Г). В целом формирование структур тектономагматической активности и зон глубинных разломов, транзитно пересекающих породы верхней коры, палеозоя и мезозоя (см. рис. 4), обуславливают не только блоково-слоистое строение геоструктур, но и благоприятствуют процессам миграции газов в кайнозойский чехол осадочных бассейнов.

Литологический состав донных осадков имеет особое значение в формировании их газонасыщенности. С увеличением зернистости отложений, как правило, наблюдается снижение газонасыщенности в литологическом ряду пелит–алеврит–псаммит. Увеличение содержаний $\text{C}_{\text{орг}}$ в литотипах приводит к нарушению данной закономерности. С возрастанием стадии катагенеза отложений от ПК₁ до МК₃ отмечается резкое увеличение в осадках концентраций водорода, метана и его гомологов. Установлено, что в слабоцементированных угленосных кайнозойских отложениях осадочных бассейнов происходит интенсивная дегазация угольных пластов и миграция газов в донные осадки. Развитие на отдельных площадях слоев глин и аргиллитов, являющихся газоупорами, в значительной мере затрудняют указанные процессы и являются факторами сохранения и накопления газов в подстилающих их отложениях. Донные осадки района исследований представлены алевропелитами (49 %), алевропсаммитами (37), реже — псаммитами и глинистыми разновидностями (14 %). Выявлена слабая корреляционная связь ($r = 0,37$) между концентрациями метана и содержанием в осадках пелитовой фракции [Геология..., 2003, 2004; Шакиров и др., 2013; Астахов и др., 2013; Гресов и др., 2017].

Геокриологические условия. Многолетнемерзлые породы (ММП) выполняют роль флюидоупора, затрудняющего процессы дегазации, «консервируют» имевшиеся газы, снижают газопроницаемость отложений и скорость их газоотдачи. Степень влияния ММП на газонасыщенность донных осадков опре-

деляется ее мощностью, выдержанностью по площади и временем образования. На участках дна с положительными температурами газонасыщенность осадков по метану и его гомологам в 1.5—8.0 раз превышает аналогичные показатели мерзлых грунтов. Аналогичная ситуация наблюдается и в показателях их газопроницаемости [Гресов, Яцук, 2013; Гресов и др., 2014]. Следует отметить, что в пределах нижней границы ММП и талых пород в зонах тектонической нарушенности установлены залежи свободных и растворенных газов, при вскрытии которых наблюдаются газопроявления и самоизлив вод с обильным газовыделением (см. рис. 1, скв. 21г, 22г, 23г и др.). С аналогичной геолого-газовой ситуацией, по-видимому, связаны «факельные» газовыделения и аномальная газонасыщенность донных осадков в пределах купольного поднятия мерзлоты и таликов Геральдско-Врангелевского массива, концентрации метана и его гомологов которых достигают 12.2 и 0.02 см³/кг соответственно [Гресов и др., 2017].

Угленосность. Катагенез углей и углистого вещества пород сопровождается образованием значительных объемов газов (метана). По данным [Patteisky, 1950; Багринцева и др., 1968; Соколов и др., 1981; Гресов, 2012] установлено, что при преобразовании тонны лигнита до бурого угля стадии ПК₁₋₂ генерируется 20—25 м³ метана, до ПК₃ — 50—55. При переходе бурых углей к каменным (до стадии МК₃) дополнительно образуется 59—75 м³ метана, от жирных к тощим (МК₄—АК₁) — 11—35. Исходя из значений (см. рис. 5, табл. 2), коэффициент сохраненности СН₄ в пластах бурых углей Айонского и Лонгского бассейнов не превышает 5 %, каменных углей Кукевеевской угленосной площади (материкового обрамления Лонгского бассейна) — 10 %.

В результате термального и контактного воздействия магматических образований на угольные пласты и углистое вещество в осадочных породах неокома до стадий МК₄—АК₁ генерировались значительные объемы водорода, углекислого газа, метана и его гомологов, часть из которых не только мигрировала в кайнозойские отложения, но и стала одной из первопричин формирования аномальных газогеохимических полей в донных осадках района исследований (см. рис. 6).

В процессе изучения влияния катагенеза углей на формирование газонасыщенности донных отложений установлено, что средние концентрации метана и его гомологов на площадях развития каменных углей в 10 и 35 раз превышают аналогичные значения на участках распространения лигнитов (см. табл. 2).

Исходя из данных табл. 2, угленосные формации являются одним из главных эпигенетических источников углекислого газа в донных осадках.

Битуминозность пород фундамента предопределила на ряде локальных участков юго-восточной части ВСМ формирование в донных осадках специфического состава газа, отличающегося газогеохимическими показателями от эпигенетических газов других газоматеринских источников (см. табл. 3) и

Таблица 3. Геохимические показатели углеводородных газов донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря

Газоматеринский источник (генетическая группа)	Весовые концентрации в долях целого на 1000*					$M_{ув}^*$, г/моль	Геохимические коэффициенты*		
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅		K _{пр}	K _{вл}	K _{сух}
I. Современные осадки (12)	998	1	Сл.	0	0	16.05	0.1	0.2	632
II. Торфяники (12)	991	7	2	Сл.	0	16.12	2.0	0.9	109
III. Лигниты (9)	987	7	4	2	Сл.	16.16	2.9	1.3	78
IV. Угольные залежи (42)	979	13	5	3	»	16.23	7.7	2.1	49
залежи бурых углей (27)	981	13	4	2	0	16.20	6.7	1.9	52
залежи каменных углей (15)	974	15	7	4	Сл.	16.29	10.2	2.6	37
V. Газовые скопления и залежи (24)	980	13	5	2	1	16.23	5.4	2.1	70
кайнозойского возраста (15)	988	7	4	1	Сл.	16.15	2.7	1.2	89
мезозойского возраста (9)**	957	29	9	4	2	16.42	12.1	4.3	22
VI. Магматические породы (18)	943	31	15	11	Сл.	16.57	23.0	6.1	17
VII. Твердые битумы (6)	845	58	41	56	0	17.66	73.6	15.5	5.4
VIII. Конденсатно-газовые скопления и залежи (21)**	892	54	20	16	18	17.12	36.7	10.8	8.9
IX. Газоконденсатные скопления и залежи (9)**	797	82	47	54	21	18.24	79.5	20.3	4.1
X. Нефтегазовые скопления и залежи (21)**	718	83	59	68	72	19.57	78.9	28.1	2.6
XI. Газонефтяные скопления и залежи (18)**	549	147	100	85	119	22.43	123.2	45.1	1.3

Примечание. C₁—C₅ — метан и его гомологи. $M_{ув}$ — молекулярная масса УВ фракции. Геохимические коэффициенты: K_{пр} — преобразованности УВ фракции, K_{вл} — «влажности», K_{сух} — «сухости». В скобках — количество проб газа.

* Средние значения.

** Предполагаемые скопления и залежи.

близкими по значениям к твердым битумам (антраксолитам) материкового обрамления района исследований (см. табл. 1).

Газонасыщенность донных осадков в пределах распространения предполагаемых залежей битумов характеризуется низкими концентрациями CO_2 , относительно высокими — H_2 и УВГ, аномальными — He , а также промежуточными значениями газогеохимических показателей между конденсатно-газовых и газоконденсатных залежей (см. табл. 2, 3).

Нефтегазоносность. Особое влияние на состав газа и газонасыщенность донных осадков оказывает нефтегазоносность района исследований. Юго-восточная часть ВСМ входит в состав Новосибирско-Чукотской нефтегазоносной провинции, в которой (с вероятностью 0.95) сосредоточено не менее 1.1 трлн м^3 газа и 700 млн т извлекаемых запасов и ресурсов нефти [Конторович и др., 2010].

Установлено, что состав газа осадков на площадях развития нефтегазовых и газонефтяных скоплений и залежей резко отличается по значениям $M_{\text{УВГ}}$, газогеохимическим коэффициентам и изотопному составу углерода CH_4 , C_2H_6 и CO_2 от остальных газоматеринских источников. На фоне относительно низких концентраций углекислого газа, метана и высоких — его гомологов донные отложения указанных площадей характеризуются аномальными содержаниями гелия и водорода (см. табл. 2, 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В геологическом строении юго-восточной части ВСМ принимают участие допалеозойские образования и палеозой-кайнозойские отложения, в которых выделяются пять структурно-стратиграфических сейсмокомплексов, разделенных между собой поверхностями несогласий: девон-среднепермский, верхнепермско-нижнеюрский, верхнеюрско-барремский, апт-верхнемеловой и кайнозойский.

В составе газа пород и донных осадков установлены: УВГ (CH_4 , C_2 – C_5 и их неопределенные гомологи), CO_2 , H_2 , He , N_2 и Ar , в редких случаях CO и H_2S . В донных отложениях присутствуют сингенетические УВГ современных осадков и эпигенетические — буроугольной формации, газовых скоплений и залежей кайнозойского возраста, мезозойских магматических пород, угольных и газовых залежей, а также предполагаемых мезозой-палеозойских битумоносных, конденсатно-газовых, газоконденсатных, нефтегазовых, газонефтяных скоплений и залежей, характеризующиеся индивидуальными геохимическими показателями, близкими по значениям к аналогам Ленского, Анадырского и Сахалинского угле-нефтегазоносных бассейнов.

Формирование газонасыщенности донных отложений и газогеохимических полей района исследований в большинстве случаев связано с процессами смешивания различных по генезису УВГ, подчиняющегося правилам аддитивности, т. е. путем последовательного накопления миграционных УВ. Это наглядно наблюдается в осадочных бассейнах, где продукты генерации разных газоматеринских источников вследствие вышеуказанного процесса суммируются, а генетические особенности газовой фазы донных осадков как бы сглаживаются, при этом отмечается доминирование геохимических показателей УВГ более газоносного газоматеринского источника.

Установлено, что газонасыщенность донных осадков в целом зависит от комплексного влияния геологических факторов, основными из которых являются история геологического развития, тектоника, магматизм, литологический состав и катагенез осадочных пород, геокриологические условия, угленосность, битумоносность и нефтегазоносность района исследований.

Авторы выражают благодарность руководству ФГУНПП «Севморгео», А.С. Астахову (ТОИ ДВО РАН) и Р.Б. Шакирову (ТОИ ДВО РАН) за поддержку в проведении морских экспедиционных газогеохимических исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-70038 «Ресурсы Арктики»; темы госзадания ТОИ ДВО РАН № 0271-2019-0006 «Газогеохимические поля морей Востока Азии, геодинамические процессы и потоки природных газов, влияющие на формирование геологических структур с залежами углеводородов и аутигенной минерализации в донных осадках» (АААА-А17-117030110035-4).

ЛИТЕРАТУРА

Астахов А.С., Гусев Е.А., Колесник А.Н., Шакиров Р.Б. Условия накопления органического вещества и металлов в донных осадках Чукотского моря // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (9), с. 1348—1365.

Багринцева К.И., Васильев В.П., Ермаков В.И. Роль угленосных толщ в процессах генерации и накопления природного газа // Геология нефти и газа, 1968, № 6, с. 12—14.

Безродных Ю.П. Строение и основные черты развития приматериковой окраины шельфовой зоны Центральной Чукотки // Советская геология, 1983, № 5, с. 73—82.

Бурлин Ю.К., Шипелькевич Ю.В. Основные черты тектонического развития осадочных бассейнов в западной части шельфа Чукотского моря и перспективы их нефтегазоносности // Геотектоника, 2006, № 2, с. 65—82.

Вашилов Ю.Я. Глубинная структура, геодинамика и геокинематика Северо-Востока России // Структура и геокинематика литосферы Востока России. Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, 1993, с. 19—43.

Велев В.Х. Молекулярная масса углеводородной фракции и весовое распределение компонентов C_1 – C_5 в природных газах разных генетических типов // Органическая геохимия нефтей, газов и органического вещества докембрия. М., Наука, 1981, с. 22—28.

Верба М.Л. Палеозойские породы в осадочном чехле северной окраины Восточно-Сибирского моря и их вклад в общую оценку перспектив нефтегазоносности // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2016, № 4, http://www.ngtp.ru/rub/5/46_2016.pdf.

Виноградов В.А., Горячев Ю.В., Гусев Е.А., Супруненко О.И. Возраст и структура осадочного чехла Восточно-Арктического шельфа России // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб., ВНИИОкеанология, 2004, вып. 5, с. 202—212.

Высоцкий И.В. Геология природного газа. М., Недра, 1979, 392 с.

Геология и полезные ископаемые шельфов России. Арктические моря России. Атлас. Лист 3—14. М., Научный мир, 2003, 278 с.

Геология и полезные ископаемые России. Т. 5. Кн. 1. Арктические моря / Под ред. И.С. Грамберга, В.Л. Иванова, Ю.Е. Погребичского. СПб., ВСЕГЕИ, 2004, 468 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1:1 000 000 (новая серия). Лист R-60-(2) — остров Врангеля. Объяснительная записка. СПб., ВСЕГЕИ, 1999, 128 с.

Государственная геологическая карта России и прилегающих акваторий. М-б 1:2 500 000. СПб., ВСЕГЕИ, 2016а.

Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1:200 000. Серия Анюйско-Чаянская, лист R-59-XXXI,XXXII. Объяснительная записка. СПб., ВСЕГЕИ, 2016б, 102 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Лаптево-Сибироморская. Лист S-53 (о. Столбовой), S-54 (Ляховские острова). Объяснительная записка. СПб., ВСЕГЕИ, 2016в, 309 с.

Грамберг И.С., Пискарев А.Л., Беляев И.В. Блоковая тектоника дна Восточно-Сибирского и Чукотского морей по данным анализа гравитационных и магнитных аномалий // ДАН, 1997, т. 353, № 5, с. 656—659.

Гресов А.И. Геохимическая классификация углеводородных газов углефтегазоносных бассейнов Востока России // Тихоокеанская геология, 2011, № 2, с. 85—101.

Гресов А.И. Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока и перспективы ее промышленного освоения. Т. II. Углеметановые бассейны Республики Саха (Якутия) и Северо-Востока России. Владивосток, Дальнаука, 2012, 468 с.

Гресов А.И. Геолого-промышленная оценка метаноресурсного потенциала и перспектив углеметанового промысла в углегазоносных бассейнах Северо-Востока России: Автореф. дис.... д.г.-м.н. Томск, ТНПУ, 2014, 52 с.

Гресов А.И., Яцук А.В. Газовая зональность и газоносность многолетнемерзлых отложений угленосных бассейнов Восточной Арктики и прилегающих регионов // Геоэкология, 2013, № 5, с. 387—398.

Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В. Геоструктурные закономерности распределения мерзлоты в углегазоносных бассейнах Северо-Востока России // Криосфера Земли, 2014, т. 18, № 1, с. 3—11.

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 // ДАН, 2016, т. 469, № 6, с. 711—713.

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, № 4, с. 78—84.

Гусев Е.А., Андреева И.А., Аникина Н.Ю., Бондаренко С.А., Деревянко Л.Г., Ключевиткина Т.С., Поляк Л.В., Полякова Е.И., Попов В.В., Степанова А.Ю. Стратиграфия позднекайнозойских осадков Чукотского моря по результатам неглубокого бурения // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып. 1. М., ГЕОС, 2009, с. 89—103.

Дараган-Суцова Л.А., Петров О.В., Соболев Н.Н., Дараган-Суцов Ю.И., Гринько Л.Р., Петровская Н.А. Геология и тектоника северо-востока Российской Арктики (по сейсмическим данным) // Геотектоника, 2015, № 6, с. 3—19.

Жигарев Л.А. Закономерности развития криолитозоны арктического бассейна // Криолитозона арктического шельфа. Якутск, ИМ СО АН СССР, 1981, с. 4—17.

- Иванов В.В.** Осадочные бассейны Северо-Восточной Азии. М., Наука, 1985, 208 с.
- Ихсанов Б.И.** Позднемезозойские и кайнозойские деформации осадочных бассейнов акватории Чукотского моря: Автореф. дис.... к.г.-м.н. М., МГУ, 2014, 22 с.
- 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.
- Катков С.М., Стрикленд А., Миллер Э.Л., Торо Дж.** О возрасте гранитных интрузий Анюйско-Чукотской складчатой системы // ДАН, 2007, т. 414, № 2, с. 219—222.
- Клубов Б.А.** Природные битумы Севера. М., Наука, 1983, 205 с.
- Конторович А.Э., Эпов М.И., Бурштейн Л.М., Каминский В.Д., Курчиков А.Р., Малышев Н.А., Прищепа 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.
- Косьюк М.К.** Восточно-Арктический шельф России: геология и тектонические основы нефтегазового геологического районирования: Автореф. дис.... д.г.-м.н. СПб., ВНИИОкеанология, 2007, 35 с.
- Малышев Н.А., Обметко В.В., Бородулин А.А., Барина Е.М., Ихсанов Б.И.** Тектоника осадочных бассейнов российского шельфа Чукотского моря // Материалы XXIII тектонического совещания: «Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя». М., ГИН РАН, 2010, т. 2, с. 23—29.
- Нестеров И.И.** Критерии прогнозов нефтегазоносности. М., Недра, 1969, 334 с.
- Никитин С.П., Тихонов А.П., Филиппов Ю.В.** О перспективах гидратоносности Восточной Якутии // Влияние механических и температурных полей на процессы аккумуляции углеводородов. Якутск, СО АН СССР, 1985, с. 111—120.
- Петровская Н.А., Савишкина М.А.** Сопоставление сейсмокомплексов и основных несогласий в осадочном чехле шельфа Восточной Арктики // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2014, № 3, с. 1—26.
- Половков В.В.** Выявление залежи углеводородов в Восточно-Сибирском море с помощью совместного использования отраженных и преломленных сейсмических волн // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2011, № 4, с. 1—17.
- Полякова И.Д., Борукаев Г.Ч., Сидоренко С.А.** Потенциальная нефтегазоносность Восточно-Сибирского моря // Геология нефти и газа, 2017, № 1, с. 3—10.
- Сдободин В.Я., Ким Б.И., Степанова Г.В., Коваленко Ф.Я.** Расчленение разреза Айонской скважины по новым биостратиграфическим данным // Стратиграфия и палеонтология мезокайнозоя Советской Арктики. 1990, с. 43—58.
- Соколов В.Л., Симоненко В.Ф., Гуляева Н.Ф.** Экспериментальное изучение газообразования при углефикации // Органическая геохимия нефтей, газов и органического вещества. М., Наука, 1981, с. 72—83.
- Сухорослов В.Л.** Кайнозойские отложения побережья пролива Лонга (северное побережье Чукотки) // Геология и геофизика, 1978 (11), с. 82—88.
- Трофимук А.А., Шило П.А., Иванов В.В.** Нефтегеологическое районирование Северо-Востока СССР и прилегающего шельфа // Проблемы нефтегазоносности Северо-Востока СССР, Тр. СВКНИИ, 1973, вып. 40, с. 3—22.
- Угольная база России.** Т.V, кн. 2. М., Геоинформмарк, 1999, 638 с.
- Фандюшкин Г.А.** Закономерности углеобразования на Северо-Востоке России. Губкин, ОАО «Губкинская типография», 2006, 344 с.
- Флюидогеодинамика и нефтегазоносность северо-восточной окраины Азии.** М-б 1: 2 500 000 / Ред. Ю.А. Косыгин. Хабаровск, Дальэрогеодезия ГУГК, 1989, 102 с.
- Цыганкова И.П.** Блоково-слоистая модель структуры Айонско-Аачимского района шельфа Восточно-Сибирского моря: Автореф. дис.... к.г.-м.н. Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, 2005, 37 с.
- Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И.** Геохимические аномалии в осадках Восточно-Сибирского моря // Вестник КРАУНЦ, 2013, № 1, с. 98—110.
- Шахова Н.Е., Семилетов И.П., Бельчева Н.А.** Растворенный метан в шельфовых водах Арктических морей // ДАН, 2005, т. 402, № 4, с. 529—533.
- Яшин Д.С., Ким Б.И.** Геохимические признаки нефтегазоносности Восточно-Арктического шельфа России // Геология нефти и газа, 2007, № 4, с. 24—35.
- Abrams M.A.** Significance of hydrocarbon seepage to petroleum generation and entrapment // Marine Petrol. Geol., 2005, № 22, p. 457—477.

Abrams M.A. Evaluation of near-surface gases in marine sediments to assess subsurface petroleum gas generation and entrapment // *Geosciences*, 2017, № 7 (2), 35, doi:10.3390/geosciences7020035.

Drachev S.S., Savostin L.A., Groshev V.G., Bruni I.E. Structure and geology of the continental shelf of the Laptev Sea, Eastern Russian Arctic // *Tectonophysics*, 1998, v. 298, p. 357—393.

Franke D., Hinz K., Reichert Ch. Geology of the East Siberian Sea, Russian Arctic, from seismic images: structures, evolutions, and implications for the evolution of the Arctic Ocean Basin // *J. Geophys. Res.*, 2004, v. 109, № 7, p. 1—19.

Jakobsson M., Mayer L., Coakley B., Dowdeswell J.A., Forbes S., Fridman B., Hodnesdal H., Noormets R., Pedersen R., Rebecco M., Schenke H.W., Zarayskaya Yu., Accettella D., Armstrong A., Anderson R.M., Bienhoff P., Camerlenghi A., Church I., Edwards M., Gardner J.V., Hall J.K., Hell B., Hestvik O., Kristoffersen Y., Marcussen C., Mohammad R., Mosher D., Nghiem S.V., Pedrosa M.T., Travaglini P.G., Weatherall P. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 // *Geophys. Res. Lett.*, 2012, v. 39, L12609, doi: 10.1029/2012GL052219.

Miller E.L., Verzhbitsky V. Structural studies near Pevek, Russia: Implications for formation of the East Siberian Shelf and Makarov Basin of the Arctic Ocean // *Geology, geophysics and tectonics of northeastern Russia: A tribute to L. Parfenov*. Stephan Mueller Special Publication Series 8, European Geophysical Union, 2009, p. 223—241.

Patteisky K. Die Entstehung des Grubengasses // *Bergbau Arch.*, 1950, Bd. 11/12, № 1, p. 5—24.

Sherwood K.W., Craig J.D., Cooke L.W., Lothamer R.T., Johnson P.P., Zerwick S.A., Scherr J., Herman B., McLean D., Haley S., Larson J., Parker J., Newman R., Drew Comer C., Banet S.M., Hurlburt S.B., Sloan P., Martin G., Horowitz W.L. 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 980054, 1998, 531 p.

Sherwood K.W., Johnson P.P., Craig J.D., Zerwick S.A., Lothamer R.T., Thurston D.K., Hurlbert S.B. Structure and stratigraphy of the Hanna Trough, U. S. Chukchi Shelf, Alaska // *Tectonic evolution of the Bering Shelf-Chukchi Sea-Arctic margin and adjacent landmasses*. GSA Special Papers, 2002, v. 360, p. 39—66.

Thurston D.K., Theiss L.A. Geologic report for the Chukchi Sea planning area, Alaska. Regional geology, petroleum geology, and environmental geology. Alaska OCS Region, Anchorage, U.S. Department of the Interior Minerals Management Service, 1987.

Verzhbitsky V.E., Sokolov S.D., Frantzen E.M., Little A., Tuchkova M.I., Lobkovsky L.I. The South Chukchi Sedimentary Basin (Chukchi Sea, Russian Arctic): Age, structural pattern, and hydrocarbon potential // *Tectonics and sedimentation: Implications for petroleum systems*. AAPG Memoir 100, 2012, p. 267—290.

*Рекомендована
А.Э. Конторовичем*

*Поступила в редакцию 15 мая 2019 г.,
принята в печать 3 февраля 2020 г.*