

УДК 553.98:550.84

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ АНОМАЛИЙ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НОВОСИБИРСКОГО ОСАДОЧНОГО БАССЕЙНА И ПРИЛЕГАЮЩИХ ГЕОСТРУКТУР ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

А.И. Греков, А.В. Яцук

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

В донных отложениях Новосибирского осадочного бассейна и прилегающих геоструктур Восточно-Сибирского моря установлены CH_4 , а также его предельные и непредельные гомологи (до C_5H_{12} включительно), CO_2 , CO , H_2 , He , H_2S , O_2 , N_2 и Ar . Изотопно-газогеохимические показатели $\delta^{13}\text{C}$ CO_2 , CH_4 и C_2H_6 , молекулярной массы углеводородной фракции и генетических коэффициентов свидетельствуют о наличии в осадках как сингенетических, так и эпигенетических газов различных газоматеринских источников, в том числе современных осадков, торфяников, углеказоносных и газоносных формаций, твердых битумов, магматических образований, скоплений газогидратов и предполагаемых конденсатно-газовых, конденсатных, нефтегазовых и газонефтяных залежей. Концентрации CO_2 и CO достигают 29.25 и 0.06 cm^3/kg , CH_4 и суммы его гомологов — 5.93 и 0.031, H_2 и He — 0.78 и 0.318, H_2S — 0.092 cm^3/kg , что указывает на формирование в донных осадках газогеохимических аномалий, превышающих критерии аномальности в 6—124 раза. Формирование и распределение аномальных концентраций природных газов зависит от комплексного влияния газоконтролирующих факторов — геологического строения, складчатой и разрывной тектоники, магматизма, угленефтегазоносности, битуминозности, органической насыщенности, литологического состава, водно-физических и коллекторских свойств отложений, гидрогеологических, геокриологических и других условий накопления и аккумуляции природных газов или их дегазации.

Донные отложения, природные газы, изотопно-газогеохимические показатели, генезис, концентрации, аномалии, геологические факторы, Новосибирский осадочный бассейн, Восточно-Сибирское море

GEOLOGICAL ASPECTS OF THE FORMATION AND DISTRIBUTION OF GAS ANOMALIES IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE NEW SIBERIAN SEDIMENTARY BASIN AND ADJACENT GEOSTRUCTURES OF THE EAST SIBERIAN SEA

А.И. Греков, А.В. Яцук

In bottom sediments of the New Siberian sedimentary basin and adjacent geostructures of the East Siberian Sea, we identified CH_4 , as well as its limit and unsaturated homologues (up to and including C_5H_{12}), CO_2 , CO , H_2 , He , H_2S , O_2 , N_2 , and Ar . Isotope-gas-geochemical parameters $\delta^{13}\text{C}$ CO_2 , CH_4 and C_2H_6 , of the molecular mass of hydrocarbon fraction and genetic coefficients indicate the presence of both syngenetic and epigenetic gases of various gas sources in sediments, including recent sediments, peatlands, coal-bearing and gas-bearing formations, solid bitumen, igneous formations, accumulations of gas hydrates and prognostic condensate-gas, condensate, oil-and-gas and gas-and-oil reservoirs. Concentrations of CO_2 and CO reach 29.25 and 0.06 cm^3/kg , CH_4 and the sum of its homologues — 5.93 and 0.031, H_2 and He — 0.78 and 0.318, H_2S — 0.092 cm^3/kg ; this indicates that gas-geochemical anomalies, exceeding the anomaly criteria by 6–124 times, form in bottom sediments. The formation and distribution of abnormal concentrations of natural gases depend on the complex influence of gas-controlling factors — geological structure, fold and fault tectonics, magmatism, coal-oil-gas content, bituminous content, organic saturation, lithological composition, water-physical and reservoir properties of sediments, hydrogeological, geocryological and other conditions for accumulation of natural gases or their degassing.

Bottom sediments, natural gases, isotope-gas-geochemical parameters, genesis, concentrations, anomalies, geological factors, New Siberian sedimentary basin, East Siberian Sea

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе представлены данные газогеохимических исследований Новосибирского осадочного бассейна и прилегающих геоструктур Восточно-Сибирского моря (ВСМ), а также материалы геологического строения и газового опробования континентального, островного обрамления и акваториальной части района исследований. Основой информационной базы являются данные экспедиционных и прибрежных исследований в период 1977—2020 гг. (рис. 1).

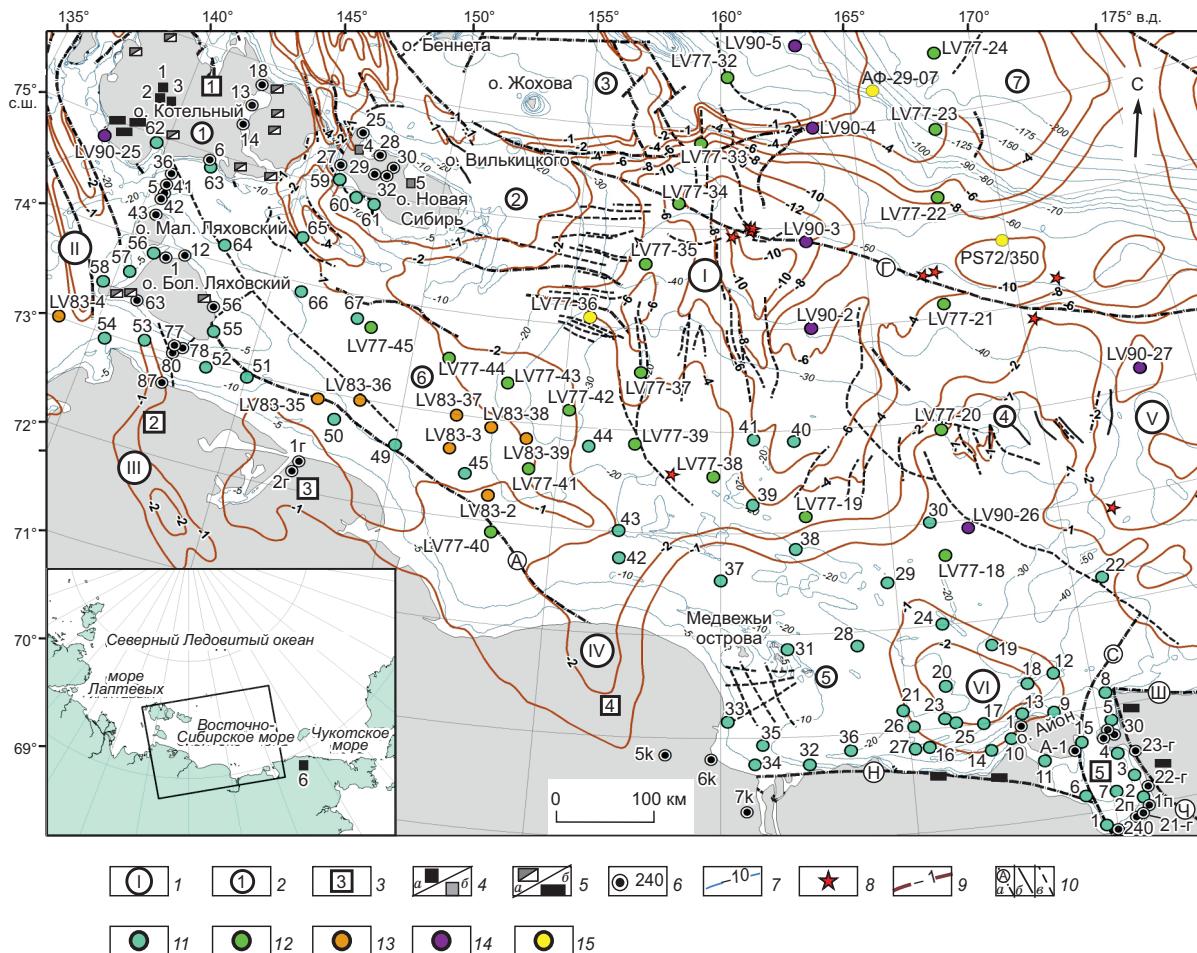


Рис. 1. Структурно-тектоническая карта района исследований [Государственная..., 2006, 2015, 2016а, 2016б]:

1 — осадочные бассейны (прогибы): I — Новосибирский, II — Бельковско-Святоносский, III — Тастанхский, IV — Приморский, V — Пегтымельский, VI — Айонский; 2 — геоструктуры — поднятия: 1 — Котельническое, 2 — Решетниковское, 3 — Лонга, 4 — Барановское, 5 — Медвежинское. Структурные террасы: 6 — Благовещенская, 7 — Северная; 3 — угленосные бассейны и площади: 1 — Анжуйский, 2 — Тастанхский, 3 — Хромская, 4 — Приморская, 5 — Чаунская; 4 — угольные месторождения каменных (a) и бурых углей (б): 1 — Балыктахское, 2 — Туорюряхское, 3 — Тугуттахское, 4 — Деревянногорское, 5 — м. Высокого, 6 — Дальнее (на врезке); 5 — углепроявления (a), битумопроявления (б); 6 — скважины газового опробования; 7 — изобаты, м; 8 — газовые факелы [Thornton, 2020]; 9 — изогипсы мощности осадочного чехла, км; 10 — структурно-тектонические элементы (a): А — Южно-Ануйская сутура, Г — Главный структурный шов, глубинные разломы — Н — Нейт-Неглинский, Ш — Шелагский, Ч — Чаунский, С — Северо-Чаунский; тектонические нарушения: б — установленные, в — предполагаемые. Донные станции и их номера: 11 — прибрежных экспедиций и попутного судового опробования, 12 — рейса LV-77, 13 — LV-83, 14 — LV-90, 15 — датировки возраста осадков. На врезке: расположение района исследований.

Главная задача работы заключалась в обобщении и сравнительном научном анализе данных геологического строения и газогеохимических исследований, позволяющих приблизиться к реальному пониманию геологической природы формирования и распределения газовых аномалий донных отложений ВСМ. Актуальность работы обусловлена не только слабой изученностью региона, но и приоритетом научных исследований в Арктической зоне Российской Федерации.

МЕТОДИКА И ОБЪЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным материалом исследований являлись керны осадков 93 донных станций длиной до 4.0 м, отобранные гидростатическими и прямоточными грунтоотборными трубками с вкладышами (реже мультикорами и дночерпательями — 16 станций, длиной керна до 0.5 м) с НИС «Академик М.А. Лаврентьев» рейсов LV-77, LV-83 и LV-90 (2016, 2018 и 2020 гг.), а также с гидрографических (2017) и попутных судов Мурманского (1977, 1980), Дальневосточного (2009, 2010, 2012, 2014) пароходств ММФ и

прибрежных экспедиций (1980, 1982, 1984, 2018 гг.) на глубинах моря 4—248 м. В процессе работ колонка керна осадков подвергалась литологическому описанию и поинтервальному отбору осадков в герметичные сосуды с последующей их дегазацией и отбором проб газа при свободном и термовакуумном выделении.

Хроматографический анализ газа выполнен в аттестованных Росстандартом газовой лаборатории ООО «Дальвостуглеразведка» и лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН на хроматографах ЛХМ 8МД, Газохром 3101, «Хроматэк-Газохром 2000» и «КристалЛюкс-4000М» в экспедиционных и стационарных условиях. Методика опробования, дегазации осадков, анализа газов и определения газонасыщенности соответствовала действующему нормативному методическому руководству «Руководство...», 1985¹; ГОСТ 23781-83, 87²; ГОСТ 31371.3-2009³ и нормативным паспортам лабораторий.

Для изучения состава газа газоматеринских источников в работе использованы материалы скважинного газового опробования керна пород, газопроявлений и газовой фазы подземных вод, хроматографический анализ которых выполнен сотрудниками лабораторий ВНИГРИ, ВСЕГИИ, Севморгео, ОАО «Дальвостуглеразведка» и ТОИ ДВО РАН [Государственная..., 2006; Яшин, Ким, 2007; Грэсов, Яцук, 2021], генезиса газа — данные масс-спектрометрии изотопных отношений (IRMS) $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$, C_2H_6 и CO_2 [Грэсов и др., 2016, 2021; Грэсов, Яцук, 2020, 2021; Yatsuk et al., 2022] лабораторий стабильных изотопов МГРИ, ВСЕГИИ, ДВГИ и Университета Хоккайдо, полученные на масс-спектрометрах Finnigan MAT-253, Deltaplus XL, выполненные по аттестованным и оптимизированным для данных исследований методикам.

Определение генезиса углеводородных газов (УВГ) выполнено на основе комплекса количественных газогеохимических показателей: молекулярной массы УВ-фракции ($M_{\text{УВ}}$), весовых концентраций углеводородов (C_1-C_5), нормированных по отношению к $M_{\text{УВ}}$ в долях целого на 1000 (или в граммах на килограмм газа УВ-фракции) [Велев, 1981] и их отношений — коэффициентов преобразованности УВ-фракции ($K_{\text{пп}}$) [Высоцкий, 1979] и «влажности» УВ-фракции ($K_{\text{вл}}$) [Abrams, 2005]. Коэффициенты $K_{\text{пп}}$ и $K_{\text{вл}}$ представлены выражениями:

$$K_{\text{пп}} = (\text{C}_2 \times \text{C}_4) / \text{C}_3 \text{ (у.ед.)} \text{ и } K_{\text{вл}} = (\Sigma \text{C}_2 - \text{C}_5) / (\Sigma \text{C}_1 - \text{C}_5) \times 100 \text{ (%)},$$

где C_1-C_5 — весовые концентрации УВ в долях на 1000.

Определение плотности и влажности осадков выполнялось методом режущего кольца термостатно-весовым способом, гранулометрического состава — методом лазерной дифрактометрии с использованием лазерного анализатора размера частиц Analyzette 22 NanoTec (Fritsch) в экспедиционных и стационарных условиях лаборатории геохимии осадочных процессов ТОИ ДВО РАН, содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ — методом ИК-детектирования на анализаторе TOC-V (Shimadzu, Япония) в лаборатории аналитической химии ДВГИ ДВО РАН. Результаты литологических исследований опубликованы в работе [Грэсов и др., 2023].

Оцифровка и пространственно-математическая интерпретация результатов исследований производилась в программном комплексе ESRI®ArcGIS с помощью модуля Geostatistical Analyst по методу обратных взвешенных расстояний (IDW).

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

В связи с отсутствием глубоких скважин, основная информация о геологическом строении района исследований базируется на данных геологических съемок континентального и островного обрамления [Государственная..., 2006, 2015; 2016а, 2016б], сейсморазведочных работ Морской арктической геолого-разведочной экспедиции (ООО «МАГЭ»), ОАО «Дальморнефтегеофизика» и «Севморгеология» [Геология..., 2003; Петровская, Савишкина, 2014; Казанин и др., 2017] и материалах изучения пород и отложений верхней части разреза по данным бурения мелких скважин [Государственная..., 2006] и грунтоотборных трубок.

Допалеозойские архей-протерозойские образования акваториальной части Барановского поднятия и Новосибирского прогиба (см. рис. 1) характеризуются по данным сейсморазведочных работ скоростями волн до 5.5 км/с и плотностью до 2.82 г/см³. Верхнепротерозойские амфиболиты и кристаллические сланцы установлены в пределах Котельнического поднятия геолого-съемочными работами на о. Большой Ляховский [Государственная..., 2006].

¹ Руководство по определению и прогнозу газоносности вмещающих пород при геолого-разведочных работах. Ростов-на-Дону, ВНИГРИуголь, 1985, 96 с.

² Газы горючие природные. Хроматографический метод определения компонентного состава. М., Госстандарт, 1983, 1987, 12 с., 14 с.

³ Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. М., Стандартинформ, 2009, 16 с.

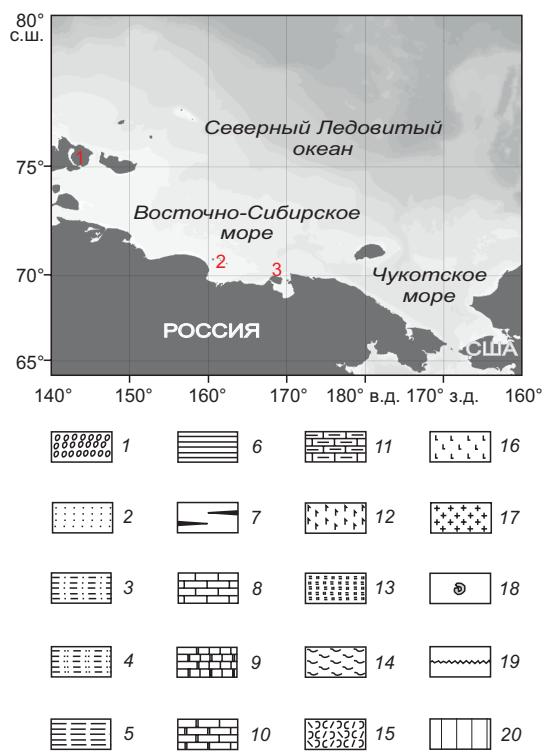
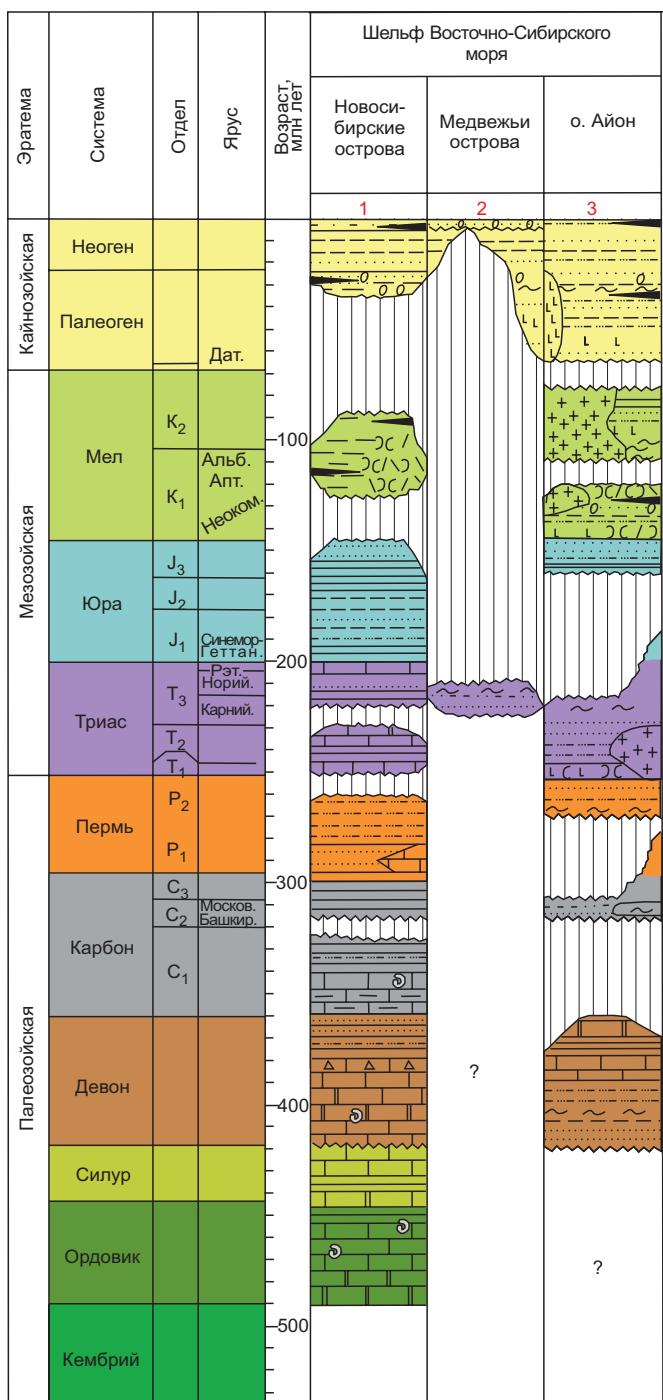


Рис. 2. Литолого-стратиграфические колонки островного обрамления Восточно-Сибирского моря [Малышев и др., 2010].

1 — конгломераты; 2 — пески, песчаники; 3 — алевролиты, суглинки; 4 — алевролиты; 5 — глины; 6 — аргиллиты; 7 — уголь; 8 — известняк; 9 — известняк доломитизированный; 10 — доломит; 11 — известковая брекчия; 12 — гипс; 13 — кварциты; 14 — фаллиты; 15 — туф риолитовый; 16 — базальты; 17 — гранитиды; 18 — обломки раковин; 19 — стратиграфическое несогласие; 20 — отсутствие отложений.

В основании палеозойских отложений выделяется кембрий-силурийский сейсмогеологический комплекс (рис. 2), сложенный доломитами, известняками и сланцами, характеризующимися скоростями волн до 4.7 км/с и плотностью пород до 2.75 г/см³.

В средней части разреза выделяется несогласно залегающий на отложениях силура девон-нижнекаменноугольный комплекс, представленный известковыми брекчиями, доломитами, известняками, алевролитами, аргиллитами и песчаниками плотностью до 2.7 г/см³ и скоростями волн до 4.3 км/с; в верхней части со стратиграфическим перерывом — среднекаменноугольный-пермский комплекс, сложенный аргиллитами, глинистыми сланцами, алевролитами, песчаниками и филлитами плотностью до 2.65 г/см³, со скоростями волн до 4 км/с. Породы данных комплексов установлены в обнажениях Новосибирских островов (см. рис. 2).

Мезозойские образования представлены триас-среднеюрским комплексом, сложенным аргиллитами, глинами, известняками, доломитами, гипсово-сидеритовыми породами, базальтами, туфоалев-

ролитами, углистыми аргиллитами с прослойями углей, песчаниками со слоями органогенных водорослевых и водорослево-детритовых известняков (плотность до 2.6 г/см^3 и скорость до 3.7 км/с), залегающими на верхнепалеозойских отложениях со стратиграфическим перерывом трансгрессивно. Породы комплекса установлены в обнажениях Новосибирских, Медвежьих островов и вскрыты скважинами на островах Малый Ляховский и Новая Сибирь. Расположенный выше верхнеюрско-барремский горизонт (подкомплекс) соответствует фазе активного рифтогенеза и характеризуется ступенчатым характером изменения мощностей осадочных и вулканогенных образований, контролируемых разломами. Верхняя часть разреза мелового комплекса представлена глинами, алевритами и алевролитами, песчаниками с прослойями конгломератов, туфопесчаниками и туфами, риолитами и пластами каменных углей. Верхнемеловые образования нижней части разреза сложены аргиллитоподобными глинами и алевритами с прослойями песчаников и бурого угля, средней — песчанистыми и углистыми алевролитами, гравийниками и галечниками, глинами и пластами бурых углей; верхней — глинами, алевритистыми песками, алевритами с линзами глин, углистыми алевролитами, пропластками и пластами бурых углей. Скорости волн мелового комплекса варьируют в пределах $2.6\text{--}3.2 \text{ км/с}$, плотности — $2.44\text{--}2.52 \text{ г/см}^3$. Высокоамплитудные отражения связаны с пластами каменных и бурых углей. Меловые образования вскрыты скважинами островного, континентального обрамления района исследований и его западной акваториальной части [Государственная..., 2006; Петровская, Савишина, 2014; Казанин и др., 2017].

Кайнозойский комплекс представлен палеоцен-четвертичными отложениями, вскрытыми скважинами и грунтоотборными трубками в пределах континентального, островного обрамления и акватуриальной части района исследований. Нижняя часть разреза комплекса представлена корой выветривания палеоцена; отложения эоцена, олигоцена, миоцена и плиоцена — переслаиванием галечников, песков, алевритов, глин, линз и пластов бурого угля, лигнитов и торфа. Четвертичные осадки сложены песками, илами, алевритами и галечниками голоцен и плейстоцена. Основными источниками поступления терригенного материала и формирования голоцен-плейстоценовых осадков являются продукты береговой и донной абразии, твердый сток рек Хрома, Индигирка и Колыма. Ледовый перенос осадков имеет второстепенное значение [Геология..., 2003; Государственная..., 2006].

Возраст голоценовых осадков северо-восточной части Новосибирского бассейна (станция PS72/350-2, см. рис. 1), по данным радиоуглеродного метода, на глубине опробования 1.1 м составляет 9.3 тыс. лет, 2.0 м — 10.3 тыс. лет [Stein et al., 2009], западной части на глубине 0.12 м (ст. LV77-36) — 0.75 тыс. лет, 0.4 м — 2.1, 0.9 м — 4.2 и 3.5 м — 8.2 тыс. лет [Astakhov et al., 2019]. Верхние 0.47 м осадков Северной террасы (ст. АФ-29-07) представлены алевритопелитами, нижние 0.5—1.9 м — твердыми плейстоценовыми пелитами, возраст которых на глубине 0.5 м (по данным метода избыточного ^{230}Th) составляет 181 тыс. лет. Радиоуглеродный анализ пелитовых осадков на глубине 1.3 м показал запредельную датировку > 44 тыс. лет [Гусев и др., 2013]. Исходя из этих данных, скорости накопления голоценовых осадков западной и северо-восточной частей бассейна изменяются от 12 до 40 см/1000 лет; плейстоценовых осадков — 2—4 см/1000 лет.

Тектоника и магматизм. В общей тектонической структуре района выделяются Новосибирский, Таставхский, Приморский, Пегтумельский и Айонский прогибы, Благовещенская структурная терраса, Котельническое, Решетниковское, Барановское и Медвежинское поднятия, а также окраинные структуры — Бельковско-Святоносский грабенообразный прогиб, поднятие Лонга и Северная структурная терраса (см. рис. 1).

Северная часть района характеризуется более мощным ($> 12 \text{ км}$) и широким возрастным объемом осадочного чехла от верхнего палеозоя до кайнозоя, залегающего на каледонском складчатом основании. В южной его части возрастной объем осадочного чехла (мощностью до 8—10 км) определяется в пределах апта—кайнозоя, залегающего на позднемезозойском основании Новосибирско-Чукотской складчатой системы, в строении которой выделяются терригенно-карбонатный комплекс нижнего—среднего палеозоя и терригенный комплекс верхнего палеозоя—нижнего мела и апт-кайнозойский комплекс бассейновых отложений. С первым комплексом ассоциируется базитовый магматизм в виде даек и штоков метадолеритов и метагаббро-долеритов, со вторым — гранитоидный магматизм заключительного этапа позднекиммерийского тектогенеза на рубеже неокома и апта, приуроченного к Южно-Анюйской рифтогенной зоне и зонам тектономагматической активизации (ТМА). Начальная стадия рифтогенеза проявилась в структурах котловины Подводников, которая, постепенно разрастаясь, привела к формированию в северной части района сквозных структур дробления, а также систем продольных складчатости фундамента разломов и нарушений в центральной части Новосибирского бассейна.

Основными структурно-тектоническими элементами складчатого основания мезоид в южной части района исследований является Южно-Анюйская сутура, в северной — Главный структурно-тектонический шов (граница областей позднемезозойской и докембрийско-каледонской складчатости). Южно-Анюйская сутура является основным тектоническим элементом мезоид региона. К северу от сутуры

расположены структуры Новосибирско-Чукотской складчатой области, южнее — Алазейско-Олойской складчатой системы, сложенной островодужными террейнами палеозойского и мезозойского возрастов и принадлежащие структурам Колымской петли [Соколов и др., 2015]. В юго-восточной части района к структурно-образующим элементам относятся Шелагский, Чаунский, Нейт-Неглинский, Айонский глубинные разломы [Государственная..., 2006, 2016а, 2016б], в пределах которых наблюдается формирование битумопроявлений (см. рис. 1).

Органическая насыщенность литотипов района достаточно высокая. В апт-кайнозойских отложениях установлены углистые алевролиты и аргиллиты, пласти каменных и бурых углей, лигнитов, торфов и органически насыщенных глин; в палеозой-мезозойских — твердые битумы, каменные угли, углистые сланцы и аргиллиты.

Битумопроявления о-вов Котельный и Бельковский, Приморской низменности и Чаунского района (см. рис. 1) характеризуются возрастным диапазоном от ордовика до мела и выходом хлороформенного битумоида A до 5.5 %, углерода — 89 %, водорода — 12 %. Отношение С/Н, равное 7—8, подтверждает происхождение рассеянного органического вещества (РОВ) из осадочных пород. Образование битумов относится к нескольким фазам их генерации и представляет собой продукт сложного преобразования и совокупного воздействия метаморфогенных и гипергенных факторов. Среди них присутствуют битумы различных классов: от малт до антраксолитов, сформировавшиеся по метаморфогенной линии преобразования и до асфальтитов и гуминокеритов под воздействием гипергенных факторов [Клубов, 1983; Государственная..., 2006].

Угленосность. В Анжуйском угленосном бассейне (см. рис. 1) на Балыктахском, Туорюяхском и Тугуттахском месторождениях установлено 3—9 нижнемеловых пластов каменного угля стадий катагенеза МК₁ мощностью до 25 м. Суммарная мощность пластов угля на месторождениях достигает 103 м, коэффициент угленосности — 22 %, содержание углерода и водорода на горючую массу — 80 и 5.8 %. В отложениях верхнего мела, эоцен, олиоцен и миоцен бассейна установлено до 10 пластов бурого угля стадий ПК₁—ПК₂ мощностью до 12 м и несколько десятков пластов мощностью до 0.95 м на месторождениях Деревянные Горы, м. Высокого суммарной мощностью 210 м с содержанием углерода и водорода до 81 и 6.7 %. В Анийском бассейне установлено до 53 пропластков и пластов каменного угля стадий катагенеза МК₁—МК₃ мощностью до 2.5 м; на месторождении Дальнее — до 14 пластов каменного угля стадий АК₁—АК₂ мощностью до 16 м. В Тастанахском бассейне и Приморской угленосной площади содержится до семи пластов бурого угля стадий катагенеза ПК₁—ПК₂ мощностью до 4 м с содержанием углерода и водорода до 78 и 7.2 %. Отложения палеоэоцен, нижнего эоценена и миоцен Чаунского угольного бассейна содержат пласти бурых углей стадий катагенеза ПК₁—ПК₂ мощностью до 6—8 м. В верхних частях разреза бассейна установлены торфяники и лигниты, а также слои миоцен-четвертичных глин с содержанием С_{опр} — 9—12 %. Кроме того, среди изученных пород выделяются слои пермско-триасовых, юрско-меловых и палеоген-неогеновых углистых сланцев, аргиллитов и глин с содержанием С_{опр} 19—42 % [Фандюшкин, 2006; Государственная..., 2006, 2015].

Газоносность. В составе газопроявлений и выбросов газа из скважин островного, континентального обрамления района исследований и его акваториальной части (скв. 6, 13, 14, 41, 87, 1г, бк, 7к, 21г, 22г, 240, 882, см. рис. 1) в интервале глубин 36—178 м установлены СН₄ и углеводородные газы (УВГ) в концентрациях до 94.7 % и 0.9 %, СО₂ — до 13.9, Не и Н₂ — до 0.02 и 4.2, О₂ и N₂ — до 14.7 и 89.7, Ar — до 0.5 % [Государственная..., 2006]. Концентрации СН₄ и суммы УВГ в четвертичных осадках достигают 1.84 и 0.006 см³/кг, торфяниках — 4.1 и 0.028, эфузивных породах — 3.3 и 0.032, песчаниках — 10.3 и 0.045, твердых битумах — 175 и 1.93, лигнитах — 177 и 2.14, бурых углях — 782 и 8.65 см³/кг в интервале глубин 10—150 м. Аналогичные показатели для СО₂ достигают 58.6 см³/кг, 118, 158, 68, 102, 177 и 187 см³/кг. Максимальные концентрации Н₂ и Не в четвертичных осадках достигают 0.432 и 0.055 см³/кг, торфяниках — 1.024 и 0.078, эфузивных породах — 8.04 и 0.28, лигнитах — 3.27 и 0.16, бурых углях — 4.16 и 0.18 см³/кг. Метаноносность бурых и каменных углей Чаунского и Чаун-Чукотского (месторождение Дальнее, см. рис. 1) угольных бассейнов на горизонте 150 м достигает 0.8 и 2.5 м³/т [Гресов, 2012; Гресов, Яцук, 2021].

Гидрогеологические и геокриологические условия региона предопределяются формированием Котельнической гидрогеологической области, Индигирского криогенно-артезианского бассейна и артезианского бассейна ВСМ, гидрогеологический режим которых обусловлен их положением в зоне многолетнемерзлых пород (ММП). Мощность ММП о-вов Котельный и Айон составляет 450—500 м, прибрежной зоны ВСМ — 50—120 м. Температуры поверхностных донных осадков Новосибирского бассейна и геоструктур района характеризуются в основном отрицательными значениями (−0.4... −1.9 °C), что обусловлено развитием ММП. Наряду с этим, установлены участки с положительными температурами осадков +0.2...+2.0 °C в интервале опробования 0.2—4.0 м. В устьях рек Индигирка, Колыма, Чаун и Паляваам зафиксированы зоны сквозных таликов. В гидрогеологическом разрезе района выде-

ляются три этажа: нижний, сложенный метаморфизованными докембрийскими и частично палеозой-нижнемезозойскими образованиями, содержащими трещинно-жильные скопления вод; средний — со скоплениями пластово-трещинных вод в мезозойских и частично в палеозойских дислоцированных отложениях и верхний — с пластовыми скоплениями подземных вод в верхнемеловых-кайнозойских слаболитифицированных отложениях [Государственная..., 2006; Греков, Яцук, 2021].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Водно-физические свойства. Показатели естественной влажности осадков (W_o) Новосибирского и Приморского бассейна составляют 18—39 %, Благовещенской террасы — 18—38, Медвежинского и Барановского поднятий — 20—43 % и закономерно уменьшаются с увеличением плотности (D) и глубины опробования осадков (табл. 1).

Значения естественной (D_o) и сухой (D_{cyx}) плотности осадков Новосибирского и Приморского бассейнов варьируют в пределах 1.62—2.02 и 0.98—1.54 г/см³, Благовещенской террасы — 1.60—2.02 и 1.00—1.52, Медвежинского и Барановского поднятий — 1.58—2.12 и 0.91—1.67 г/см³. Максимумом средних значений D_o характеризуются алеврит-пелит-псаммитовые осадки верхнего горизонта Барановского поднятия (1.90 г/см³) и аналогичные — нижнего горизонта Благовещенской террасы (1.98 г/см³) со средним содержанием псаммитовой фракции в осадках 5—10 %, минимумом — алевритовые осадки Новосибирского бассейна и террасы верхнего горизонта (1.69—1.73 г/см³) со средним содержанием псаммитовой фракции 0—2 %. Промежуточные значения (1.74—1.86 г/см³) установлены в алеврит-пелитовых отложениях бассейнов, террасы и поднятий средней части разреза со средним содержанием псаммитовой фракции 1—5 % [Греков и др., 2023].

Разница значений (D_o) и (D_{cyx}), умноженная на переводной процентный коэффициент 100, отражает показатель «пустотности» осадков или их общей пористости. С вычетом значения влажности осадков из этого показателя можно оценить «пустотный» объем, доступный для газа, или эмпирический показатель открытой пористости (K_o). Максимальными средними значениями K_o (29—33 %) характеризуются пелитовые осадки Новосибирского бассейна на глубинах их опробования 2—4 м, минимальными (17—19 %) — алеврит-пелит-псаммитовые осадки поднятий, террасы и бассейна верхней части разреза; промежуточными (22—28 %) — алевритовые осадки района исследований на глубинах опробования 0.5—2.0 м (см. табл. 1). Следует отметить, что песчанистые осадки характеризуются межгранулярной пористостью, в алевритовых — доминируют макропоры, в пелитовых — микропоры. Данная изменчивость предопределяет различный характер скорости газоотдачи осадков в процессе их дегазации. Минимальными объемами газа и временем дегазации характеризуются голоценовые алеврит-пелит-псаммитовые осадки, максимальными — тугопластичные плейстоценовые пелитовые осадки нижних горизонтов опробования, что косвенно указывает на различную степень их газопроницаемости.

Биогенные компоненты. Содержание C_{opr} в донных осадках закономерно снижается в мористом направлении от 3.24 % в Чаунской впадине до 0.43 % в северной части Новосибирского бассейна. Среднее содержание C_{opr} в осадках Айонского бассейна составляет 1.79 %, Приморского — 1.35, Пегтымельского — 1.30 и Новосибирского — 0.96, Благовещенской террасы — 1.33, Котельнического и Решетниковского поднятий — 1.32, Медвежинского и Барановского — 1.22 %. В донных осадках западной части района установлены прослои сапропелей мощностью от 3 до 12 см.

Газогеохимические показатели. В составе природных газов (ПГ) донных осадков района исследований установлены: УВГ, CO_2 , CO , H_2 , He , H_2S , O_2 , N_2 и Ar .

Углеводородные газы и углекислый газ. В результате обработки и анализа полученных значений M_{UV} , весовых концентраций $C_1—C_5$, $K_{вл}$, $K_{пр}$, $\delta^{13}C—CH_4$, $\delta^{13}C—CO_2$ и данных [Греков, 2012; Греков, Яцук, 2021] в донных осадках района исследований установлено одиннадцать генетических групп УВГ и CO_2 различных литотипов и газоматеринских источников. Сингенетические УВГ и CO_2 современных осадков характеризуются значениями $\delta^{13}C CH_4$ и CO_2 —82.8...—77.2 ‰ и —57.6...—54.6 ‰, M_{UV} — до 16.06 г/моль, $K_{вл}$ — до 0.2 % и практически отсутствием C_4 и C_5 , что указывает на биохимическую природу их образования. Эпигенетическим (миграционным) УВГ, CO_2 торфяникам свойственно доминирование биохемогенной составляющей с незначительной примесью метаморфогенной. Значения показателей $\delta^{13}C CH_4$ и CO_2 в среднем составляют —69.8 и —36.2 ‰, M_{UV} , $K_{вл}$ и $K_{пр}$ — 16.13 г/моль, 1.0 % и 2.1 соответственно. Исходя из значений газогеохимических показателей M_{UV} , $K_{вл}$, $K_{пр}$, равных 16.08—16.11 г/моль, 0.4—0.9 %, 0.2—3.2, и $\delta^{13}C CH_4$, C_2H_6 и CO_2 (—62.8...—59.7, —29.6...—27.8 и —29.4...—25.0 ‰), УВГ и CO_2 гидратных залежей относятся к полигенезисной группе газов.

В УВГ и CO_2 лигнитов, бурых углей и кайнозойских газовых залежей наблюдается паритетное распределение биохимической и метаморфической составляющей, на что указывают средние показатели M_{UV} , $K_{вл}$, $K_{пр}$, равные 16.1 и 16.21 г/моль, 1.4 и 2.1 %, и 2.6 и 7.3 у.ед., а также $\delta^{13}C CH_4$ и CO_2 (—65.2 и —59.3 ‰; —26.7 и —24.2 ‰), характерные для ОВ и угольного вещества (УВ) стадий катагенеза ПК₁—

Таблица 1. Водно-физические и газогеохимические показатели донных отложений осадочных бассейнов и геоструктур района исследований

Показатель	Значения литологических, водно-физических и газогеохимических показателей донных отложений по интервалам их опробования, см				
	20—40	40—100	100—200	200—300	300—400
1	2	3	4	5	6
Новосибирский и Приморский осадочные бассейны					
W_o , %	<u>30.0—39.0*</u> 35.5 (5)	<u>29.1—39.1</u> 33.0 (8)	<u>22.1—38.9</u> 32.3 (15)	<u>18.0—36.5</u> 30.3 (6)	<u>24.4—25.8</u> 24.8 (3)
D_o , г/см ³	<u>1.63—1.82</u> 1.69 (5)	<u>1.62—1.86</u> 1.71 (8)	<u>1.63—1.99</u> 1.79 (15)	<u>1.70—2.02</u> 1.84 (6)	<u>1.78—1.82</u> 1.80 (3)
D_{cyx} , г/см ³	<u>1.00—1.28</u> 1.10 (5)	<u>1.01—1.24</u> 1.14 (8)	<u>0.98—1.51</u> 1.20 (15)	<u>1.11—1.52</u> 1.22 (6)	<u>1.16—1.24</u> 1.20 (3)
K_o , %	<u>19.0—24.9</u> 23.0 (5)	<u>22.3—29.8</u> 25.3 (8)	<u>22.0—33.0</u> 26.4 (15)	<u>26.9—33.0</u> 31.7 (6)	<u>32.4—33.6</u> 32.9 (3)
C_{opr} , %	<u>0.42—1.36</u> 0.93 (5)	<u>0.61—1.36</u> 0.92 (8)	<u>0.58—1.37</u> 0.84 (17)	<u>0.42—1.57</u> 0.84 (12)	<u>0.42—1.31</u> 0.88 (3)
CH_4 , см ³ /кг	<u>0.0017—0.0050</u> 0.0026 (5)	<u>0.0022—0.0439</u> 0.0093 (8)	<u>0.0022—2.0973</u> 0.1251 (19)	<u>0.0023—0.1199</u> 0.0409 (12)	<u>0.0036—5.9371</u> 2.9470 (3)
$\Sigma C_2—C_5$, см ³ /кг	<u>0.00018—0.0004</u> 0.00028 (5)	<u>0.00020—0.0022</u> 0.00074 (8)	<u>0.00021—0.0312</u> 0.0036 (19)	<u>0.0003—0.0155</u> 0.0027 (12)	<u>0.0003—0.0134</u> 0.0064 (3)
CO_2 , см ³ /кг	<u>0.43—4.03</u> 2.12 (5)	<u>0.68—4.34</u> 2.28 (8)	<u>0.58—17.45</u> 4.07 (19)	<u>0.77—14.82</u> 5.02 (12)	<u>1.62—19.19</u> 11.55 (3)
CO , см ³ /кг	<u>0.0127—0.0317</u> 0.0203 (5)	<u>0.0192—0.0497</u> 0.0305 (7)	<u>0.0192—0.0573</u> 0.0423 (17)	<u>0.0314—0.0597</u> 0.0459(11)	<u>0.0308—0.0597</u> 0.0429 (3)
H_2 , см ³ /кг	<u>0.0049—0.3857</u> 0.0859 (5)	<u>0.0049—0.1599</u> 0.0763 (7)	<u>0.0084—0.7812</u> 0.1489 (17)	<u>0.0057—0.7472</u> 0.1346 (11)	<u>0.0009—0.75</u> 0.2506 (3)
He , см ³ /кг	<u>0.0012—0.0071</u> 0.0049 (5)	<u>0.0012—0.0061</u> 0.0039 (7)	<u>0.0006—0.0803</u> 0.0119 (17)	<u>0.0008—0.0803</u> 0.0261 (10)	<u>0.0001—0.0781</u> 0.0261 (3)
O_2 , %	<u>12.15—17.98</u> 14.48 (5)	<u>6.22—13.67</u> 10.03 (8)	<u>2.78—15.85</u> 7.82 (19)	<u>2.14—12.03</u> 7.10 (12)	<u>2.94—7.33</u> 5.01 (3)
Благовещенская структурная терраса					
W_o , %	<u>32.1—38.0</u> 35.3 (3)	<u>30.0—37.0</u> 33.5 (2)	<u>27.4—33.0</u> 30.1 (3)	<u>18.2—27.2</u> 22.4 (3)	h.o.
D_o , г/см ³	<u>1.60—2.00</u> 1.76 (3)	<u>1.66—1.80</u> 1.73 (2)	<u>1.70—1.79</u> 1.74 (3)	<u>1.96—2.02</u> 1.98 (3)	»
D_{cyx} , г/см ³	<u>1.00—1.40</u> 1.17 (3)	<u>1.04—1.24</u> 1.14 (2)	<u>1.15—1.23</u> 1.18 (3)	<u>1.46—1.54</u> 1.50 (3)	»
K_o , %	<u>22.0—24.2</u> 23.3 (3)	<u>23.8—26.2</u> 24.9 (2)	<u>25.6—26.0</u> 25.8 (3)	<u>25.2—27.8</u> 26.4 (3)	»
C_{opr} , %	<u>1.42—2.02</u> 1.68 (6)	<u>1.42—1.50</u> 1.44 (5)	<u>0.74—1.37</u> 1.02 (4)	<u>0.64—0.92</u> 0.78 (2)	»
CH_4 , см ³ /кг	<u>0.0012—0.0042</u> 0.0027 (6)	<u>0.0016—0.0091</u> 0.0048 (5)	<u>0.0071—0.6723</u> 0.2161 (6)	<u>0.0499—0.3486</u> 0.1993 (2)	»
$\Sigma C_2—C_5$, см ³ /кг	<u>0.00003—0.0004</u> 0.00024 (6)	<u>0.0002—0.0004</u> 0.0003 (5)	<u>0.0003—0.015</u> 0.0056 (6)	<u>0.0080—0.0259</u> 0.0170 (2)	»
CO_2 , см ³ /кг	<u>0.14—3.05</u> 1.60 (6)	<u>1.01—7.20</u> 3.30 (5)	<u>1.14—14.02</u> 7.12 (6)	<u>2.82—22.72</u> 12.87 (2)	»
CO , см ³ /кг	<u>0.0153—0.0350</u> 0.0242 (6)	<u>0.0217—0.0330</u> 0.0282 (4)	<u>0.0399—0.0512</u> 0.0455 (2)	<u>0.0581</u> 0.0581	»
H_2 , см ³ /кг	<u>0.0008—0.5663</u> 0.1401 (6)	<u>0.0038—0.570</u> 0.1171 (5)	<u>0.0018—0.1772</u> 0.0579 (4)	<u>0.0058—0.1212</u> 0.0635 (2)	»
He , см ³ /кг	<u>0.0021—0.0975</u> 0.0194 (6)	<u>0.0046—0.3084</u> 0.1214 (5)	<u>0.0005—0.0547</u> 0.0203 (3)	h.o.	»
O_2 , %	<u>6.33—16.80</u> 12.33 (6)	<u>6.69—14.48</u> 9.98 (5)	<u>2.62—15.96</u> 7.59 (6)	<u>2.34—4.77</u> 3.55 (2)	»
Барановское и Медвежинское поднятие					
W_o , %	<u>21.6—43.2</u> 35.0 (4)	<u>25.4—28.7</u> 27.0 (5)	<u>20.1—26.4</u> 23.2 (5)	h.o.	h.o.

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
D_o , г/см ³	<u>1.58—2.12</u> 1.90 (4)	<u>1.69—1.86</u> 1.80 (5)	<u>1.81—1.92</u> 1.86 (2)	н.о.	н.о.
$D_{\text{сух}}$, г/см ³	<u>0.91—1.67</u> 1.40 (4)	<u>1.18—1.36</u> 1.29 (5)	<u>1.29—1.42</u> 1.36 (2)	»	»
K_o , %	<u>17.0—24.6</u> 22.4 (4)	<u>22.3—26.5</u> 24.8 (5)	<u>25.6—29.9</u> 27.8 (2)	»	»
$C_{\text{опр}}$, %	<u>0.60—1.64</u> 1.07 (4)	<u>0.73—1.54</u> 1.24 (5)	<u>0.91—1.74</u> 1.37 (7)	»	»
CH_4 , см ³ /кг	<u>0.0057—0.0300</u> 0.0201 (4)	<u>0.0034—0.570</u> 0.1553 (5)	<u>0.0216—0.5760</u> 0.2301 (7)	»	»
$\sum \text{C}_2—\text{C}_5$, см ³ /кг	<u>0.00002—0.0011</u> 0.0004 (4)	<u>0.00002—0.0018</u> 0.0007 (5)	<u>0.0001—0.0090</u> 0.0017 (7)	»	»
CO_2 , см ³ /кг	<u>3.63—12.44</u> 6.12 (4)	<u>2.09—23.42</u> 7.42 (5)	<u>4.72—23.80</u> 13.76 (7)	»	»
CO , см ³ /кг	<u>0.0301—0.0528</u> 0.0415 (2)	<u>0.0518</u> 0.0518	н.о.	»	»
H_2 , см ³ /кг	<u>0.0035—0.0108</u> 0.0074 (4)	<u>0.0047—0.0194</u> 0.0126 (3)	<u>0.0108—0.0198</u> 0.0148 (3)	»	»
He , см ³ /кг	<u>0.0021—0.0024</u> 0.0023 (2)	<u>0.0009</u> 0.0009	<u>0.0038</u> 0.0038	»	»
O_2 , %	<u>7.61—13.40</u> 11.03 (4)	<u>7.80—13.40</u> 10.09 (5)	<u>5.41—8.90</u> 7.01 (7)	»	»
Айонский осадочный бассейн					
$C_{\text{опр}}$, %	<u>1.98—2.87</u> 2.12 (3)	<u>1.32—2.58</u> 1.66 (9)	<u>1.40—2.42</u> 1.71 (10)	<u>1.32—3.24</u> 1.98 (5)	<u>1.34—1.92</u> 1.61 (3)
CH_4 , см ³ /кг	<u>0.0070—0.0210</u> 0.0117 (3)	<u>0.0070—0.0528</u> 0.0382 (9)	<u>0.0013—1.3650</u> 0.1738 (10)	<u>0.0096—1.8211</u> 0.4461 (5)	<u>0.1281—1.1380</u> 0.7261 (3)
$\sum \text{C}_2—\text{C}_5$, см ³ /кг	<u>0.00005—0.0001</u> 0.0001 (3)	<u>0.00001—0.0034</u> 0.0008 (9)	<u>0.0001—0.0076</u> 0.0019 (10)	<u>0.0001—0.0281</u> 0.0065 (5)	<u>0.0012—0.0148</u> 0.0078 (3)
CO_2 , см ³ /кг	<u>0.84—2.40</u> 1.63 (3)	<u>0.91—5.17</u> 2.69 (9)	<u>1.69—29.25</u> 8.65 (10)	<u>3.14—16.02</u> 12.71 (5)	<u>5.17—18.82</u> 13.34 (3)
CO , см ³ /кг	н.о.	<u>0.0047</u> 0.0047	<u>0.0445</u> 0.0445	н.о.	н.о.
H_2 , см ³ /кг	<u>0.0032—0.0616</u> 0.0324 (2)	<u>0.0035—0.0149</u> 0.0102 (5)	<u>0.0104—0.1871</u> 0.0725 (5)	<u>0.0103—0.1028</u> 0.0512 (4)	<u>0.0039—0.1236</u> 0.0585 (3)
He , см ³ /кг	н.о.	<u>0.0045</u> 0.0045	<u>0.0047—0.0234</u> 0.0136 (3)	<u>0.0020—0.0432</u> 0.0282 (3)	<u>0.0046—0.0394</u> 0.0188 (3)
O_2 , %	<u>9.72—11.47</u> 10.53 (3)	<u>3.06—11.47</u> 8.22 (9)	<u>1.48—11.28</u> 7.39 (10)	<u>3.43—8.24</u> 5.51 (5)	<u>2.10—3.43</u> 2.75 (3)
Котельническое и Решетниковское поднятие					
$C_{\text{опр}}$, %	<u>0.98—1.72</u> 1.53 (9)	<u>1.14—1.64</u> 1.45 (4)	<u>0.94—1.24</u> 1.06 (5)	н.о.	н.о.
CH_4 , см ³ /кг	<u>0.0048—0.0654</u> 0.0198 (9)	<u>0.0210—0.4580</u> 0.1403 (4)	<u>0.0637—0.6902</u> 0.3698 (5)	»	»
$\sum \text{C}_2—\text{C}_5$, см ³ /кг	<u>0.00003—0.0006</u> 0.0002 (9)	<u>0.00004—0.0036</u> 0.0021 (4)	<u>0.0005—0.0090</u> 0.0043 (5)	»	»
CO_2 , см ³ /кг	<u>1.90—21.16</u> 12.08 (9)	<u>11.14—17.05</u> 12.29 (4)	<u>7.17—17.63</u> 13.78 (5)	»	»
CO , см ³ /кг	<u>0.0382—0.0577</u> 0.0478 (2)	н.о.	н.о.	»	»
H_2 , см ³ /кг	<u>0.0035—0.758</u> 0.1653 (7)	<u>0.0132—0.227</u> 0.1341(4)	<u>0.0482—0.578</u> 0.2214 (5)	»	»
He , см ³ /кг	<u>0.0042—0.0482</u> 0.0191 (3)	н.о.	н.о.	»	»
O_2 , %	<u>6.42—16.80</u> 13.47(9)	<u>8.84—13.40</u> 10.73 (4)	<u>4.77—8.90</u> 6.78 (5)	»	»

Примечание. W_o и D_o — влажность и плотность осадка в естественных условиях. $D_{\text{сух}}$ — плотность осадка в сухом состоянии. K_o — открытая пористость. Полужирным шрифтом выделены аномальные концентрации газов, н.о. — не определялся.

* Минимум—максимум/среднее (число случаев).

Таблица 2. Средние значения газогеохимических показателей УВГ донных отложений различных литотипов и газоматеринских источников района исследований

Литотип, источник газа (номера донных станций)	Весовые концентрации в долях целого на 1000					$M_{\text{УВ}}$, г/моль	$K_{\text{пр}}$, усл. ед.	$K_{\text{вл}}$ %	$\delta^{13}\text{C}$ CO_2	$\delta^{13}\text{C}$ CH_4
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5				%	‰
Современные осадки* (5, 7, 32–35, 57, 62, 64)	999	1	сл.	0	0	16.05	0.25	0.15	-56.3	-80.3
Газогидраты? (44, LV77-36, LV77-42; LV90-2)	994	3	2	1	0	16.10	1.7	0.6	-27.3	-60.4
Торфяники (11, 20, 21, 23, 26, 55, 59)	990	8	1	сл.	0	16.13	2.1	1.0	-36.2	-69.8
Угленосные формации:	976	16	5	3	сл.	16.23	8.3	2.4	-24.0	-58.6
лигниты и бурые угли (1, 2, 3, 6, 15, 16, 26, 27, 31, 58, 60, 63, 66, LV83-3)	980	14	4	2	»	16.20	6.8	2.0	-24.2	-59.3
каменные угли (10, 14, 24, 28, 37, 49, 51, 53, LV77-19, LV90-26)	972	18	6	3	»	16.28	9.4	2.8	-23.7	-58.0
Газоносные формации:	979	14	4	3	»	16.28	8.2	2.7	-25.6	-61.6
кайнозойского возраста (17, 25, 29, 36, 61)	986	10	3	1	»	16.15	2.6	1.4	-26.7	-65.2
мезозойского возраста** (19, LV77-18)	959	24	7	8	1	16.42	13.7	4.2	-24.5	-58.0
Магматические породы (4, 8, 52, 56, LV83-2, LV83-39, LV90-3, LV90-25-3)	929	47	18	7	0	16.70	15.7	7.7	-15.4	-25.8
Конденсатно-газовые залежи** (9, 12, 13, 45, 67, LV77-21, LV77-22, LV83-4, LV90-4, LV90-27)	880	73	28	16	2	17.14	40.2	12.0	-22.5	-53.8
Твердые битумы (42, 50, LV77-23, LV83-35, LV83-36, LV83-38, LV90-5)	848	69	42	34	7	17.64	47.4	16.0	-21.2	-51.1
Конденсатные залежи** (30, 39, LV90-3, LV90-26)	768	110	54	39	29	18.50	72.3	23.2	-21.7	-49.2
Нефтегазовые залежи** (18, 22, 38, 43, 65, LV77-20, LV77-24, LV77-34, LV77-40, LV77-41, LV77-43, LV83-37)	720	118	82	71	9	19.22	102.4	28.0	-20.7	-43.8
Газонефтяные залежи** (40, 41, LV77-32, LV77-33, LV77-35)	586	177	103	123	11	21.19	207.7	41.2	-20.2	-42.8

* Исходя из данных датировки возраста донных отложений, мощность современных осадков не превышает 40 см.

** Предполагаемый газоматеринский источник.

ПК₂. Данное положение относится к газам верхнемеловых-палеоценовых бурых углей: $M_{\text{УВ}}$ — 16.23 г/моль, $K_{\text{вл}}$ — 2.3 %, $K_{\text{пр}}$ — 7.8 и $\delta^{13}\text{C}$ CH_4 и CO_2 — (-59.0 и -25.0 ‰). Геохимические показатели миграционных УВГ и CO_2 нижнемеловых каменных углей, мезозой-палеозойских битумов и газовых, конденсатногазовых, конденсатных, нефтегазовых, газонефтяных залежей относятся к метаморфогенным ПГ, эфузивных пород — к магматогенным; со средними показателями $M_{\text{УВ}}$ — 16.28—21.19 г/моль, $K_{\text{вл}}$ — 2.8—41.2 %, $K_{\text{пр}}$ — 9.4—207.7 и значениями $\delta^{13}\text{C}$ CH_4 , C_2H_6 и CO_2 (-58.0...-25.8, -28.9...-17.0 и -24.5...-15.4 ‰), характерными для УВ и ОВ стадий катагенеза МК₁—МК₃ и АК₂ (табл. 2).

Концентрации CO_2 , CH_4 и суммы УВГ в осадках района исследований изменяются в пределах 0.14—29.25, 0.0012—5.93 и 0.00002—0.0318 см³/кг и закономерно возрастают с увеличением глубины их опробования. При этом концентрации CO_2 в осадках верхнего горизонта опробования района имеют относительно высокие значения (в среднем 5.9 см³/кг, см. табл. 1), что указывает на значительную роль CO_2 в формировании его аномалий в современных осадках. Исходя из данных [Яшин, Ким, 2007], к аномалиям CO_2 относятся значения его концентраций > 2.5 см³/кг, CH_4 и УВГ > 0.05 и 0.001 см³/кг. В целом максимальные концентрации CO_2 , CH_4 и УВГ в осадках локальных зон превышают пороговые показатели аномальности (ПА) в 11.7, 118.9 и 31.8 раза. Образование нескольких соседних локальных аномалий на определенной площади предопределяет формирование в донных отложениях района исследований аномальных газогеохимических полей.

Формирование наиболее крупного аномального газогеохимического поля метана (I) с концентрациями 0.056—5.930 см³/кг и значениями ПА 1.1—119.0 установлено в осадках западного и юго-восточного крыльев Новосибирского бассейна, Благовещенской террасы, Медвежинского поднятия и северной части Приморского бассейна. В южной части поля, в пределах Благовещенской террасы, Приморского бассейна и Котельнического поднятия, формирование аномальных концентраций CH_4 до 0.67 см³/кг и ПА до 13.4 связано с его миграцией из подстилающих газоносных отложений Южно-Ануйской сутуры. Донные отложения северной части Медвежинского поднятия имеют значения ПА — 1.1—2.2, южной — в долине пра-Колымы — 1.0—11.6 (рис. 3, а).

В донных отложениях Чаунской впадины и Айонского бассейна установлено второе аномальное газогеохимическое поле метана (II) с концентрациями 0.05—1.82 см³/кг и значениями ПА — 1.0—36.4,

осложненного развитием Нейтлин-Наглейненского, Шелагского, Чаунского и Айонского глубинных разломов. Формирование третьего газогеохимического поля (III) с концентрациями метана 0.36—0.69 см³/кг и значениями ПА — 7.2—13.8 установлено в осадках Таствахского бассейна и Бельковско-Святоносского грабенообразного прогиба. В осадках Решетниковского поднятия концентрации CH₄ составляют 0.064—0.630 см³/кг, что позволяет выделить в этом районе четвертое геохимическое поле (IV) со значениями ПА — 1.3—12.6.

В процессе исследований выделены четыре основных аномальных газогеохимических поля углеводородных газов (см. рис. 3, б). Формирование первого поля (I) с максимальными концентрациями УВГ в двух аномальных гипоцентрах (0.026—0.031 см³/кг и ПА — 26—31) установлено в осадках Благовещенской террасы, западного крыла Приморского бассейна в пределах Южно-Ануйской сутуры и юго-восточного крыла Новосибирского бассейна. При этом южная часть поля имеет свое продолжение в осадках Благовещенской террасы, Медвежинского и Барановского поднятий, где концентрации УВГ составляют 0.0080—0.0083 и 0.0011—0.0050 см³/кг, а значения ПА — 8.0—8.3 и 1.1—5.0. В северо-западной части поля концентрации УВГ в осадках западного крыла Новосибирского бассейна и поднятии Лонга составляют 0.0026—0.0134 см³/кг, значения ПА — 2.6—13.4.

Образование второго аномального поля УВГ (II) с концентрациями 0.002—0.0043 см³/кг и ПА — 2.0—4.3 связано с процессами их миграции из подстилающих газонасыщенных отложений в осадки северного и северо-восточного крыла Новосибирского бассейна. В донных отложениях Чаунской впадины и Айонского бассейна установлено третье газогеохимическое поле (III) с концентрациями УВГ 0.0012—0.028 см³/кг и ПА — 1.2—28. Формирование четвертого поля (IV) с концентрациями УВГ — 0.0036—0.009 см³/кг и ПА — 3.6—9 установлено в осадках Бельковско-Святоносского грабенообразного прогиба и Таствахского бассейна. Аномальные локальные зоны УВГ в осадках Котельнического и Решетниковского поднятий характеризуются концентрациями 0.0014—0.0065 см³/кг и ПА — 1.4—6.5.

Концентрация углекислого газа в донных осадках района исследований достигает 29.25 см³/кг. Формирование в осадках соседних донных станций концентраций CO₂ > 2.5 см³/кг (ПА > 1) на значительной площади предопределило образование одного аномального газогеохимического поля (I). Максимальные концентрации CO₂ — 21.2—29.3 см³/кг и ПА — 8.5—11.7 установлены в талых донных отложениях Чаунской впадины. Концентрации CO₂ — 10.4—23.8 см³/кг и ПА — 4—9.5 установлены в южной части Медвежинского поднятия. Донные осадки центральной части газогеохимического поля в пределах северо-западного, западного крыла Новосибирского бассейна, северной части Приморского бассейна и юго-восточной части Благовещенской террасы характеризуются концентрациями CO₂ — 10.1—19.2, 3.9—8.6 и 2.8—22.7 см³/кг и ПА — 4.0—7.7, 1.6—3.4, 1.1—9.1. В западной части поля осадки Таствахского бассейна и Котельнического поднятия имеют концентрации CO₂ — 15.4—17.6 и 10.7—21.2 см³/кг и ПА — 6—7 и 4.0—8.5 (рис. 4, а).

Присутствие оксида углерода в донных отложениях района исследований объясняется не только недоокислением ОВ осадков кислородом в условиях развития ММП, но и его миграцией из подстилающих магматических образований и угленосных формаций в зонах ТМА, разломов и крупных нарушений. Установлено, что концентрации CO в осадках изменяются в пределах 0.0045—0.06 см³/кг и характеризуются возрастанием с увеличением глубины опробования осадков и снижением с повышением содержаний O₂ (см. табл. 1). Обработка полученных данных и материалов [Гресов и др., 2021; Гресов, Яцук, 2021] позволила с определенной долей условности отнести к аномалиям концентрации CO в осадках > 0.01 см³/кг. Формирование в осадках соседних донных станций концентраций CO > 0.01 см³/кг (ПА > 1) предопределило образование одного аномального газогеохимического поля CO (I) с семью гипоцентрами ПА > 5 (см. рис. 4, б), в том числе в области развития каледонской складчатости, структур сквозного дробления и систем тектонических нарушений — в центральной части Новосибирского бассейна, что указывает на различную природу образования и распределения CO от УВГ и CO₂. Характеристика изменчивости распределения CO по разрезу опробования осадков приведена в табл. 1. Следует отметить, что изучение CO в осадках станций 1—7, 9—12, 14—37, 39—62 не производилось.

В процессе исследований установлена как сингенетическая, так и эпигенетическая природа образования водорода в донных осадках. Сингенетическое образование H₂ связано с биохимическими процессами преобразования гумусового и сапропелевого ОВ донных отложений. Установлено, что содержания H₂ в колонках керна с прослойками сапропелей в 2.0—2.5 раза больше, чем с гумусовым ОВ. Максимальные содержания миграционного H₂ в осадках наблюдаются на площадях развития ТМА, разломов и крупных нарушений, где он является магматической и метаморфической генетической составляющей.

Концентрации водорода в донных осадках района исследований изменяются в пределах 0.0008—0.781 см³/кг и имеют тенденцию к возрастанию средних значений от 0.073 до 0.155 см³/кг с увеличением глубины опробования осадков в интервале 0.7—4.0 м, что указывает на миграционный характер его распределения по разрезу. При этом средние концентрации H₂ горизонта опробования 0.2—0.7 м определяются относительно высокими значениями до 0.109 см³/кг (см. табл. 1), что, по-видимому, связано с

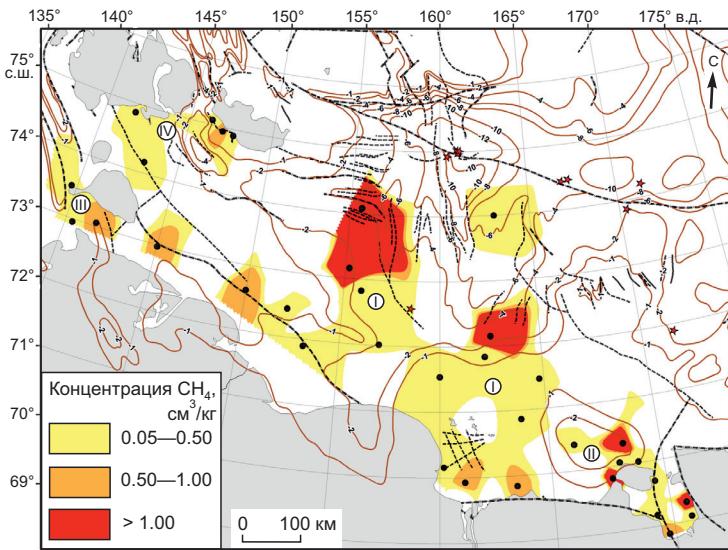
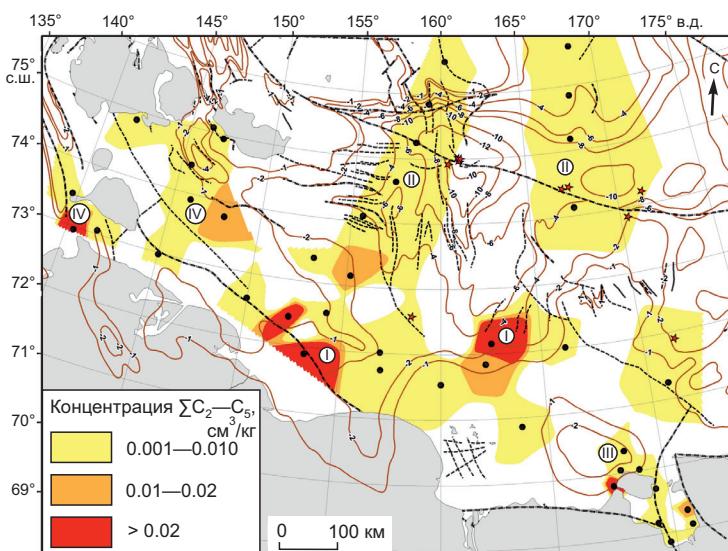
a*b*

Рис. 3. Распределение аномальных газогеохимических полей метана (*a*) и его гомологов (*b*) в донных осадках района исследований.

Усл. обозн. см. на рис. 1.

биохимическими преобразованиями в этом интервале прослоев сапропелей с образованием водорода и процессами его смешивания с миграционной составляющей. Исходя из материалов [Гресов и др., 2021; Гресов, Яцук, 2021], к аномалиям H_2 в осадках относятся его концентрации $> 0.01 \text{ см}^3/\text{кг}$. В донных осадках района установлено образование одного крупного (I) и двух более мелких аномальных газогеохимических полей (II, III) H_2 с концентрациями $0.011–0.781, 0.0103–0.187, 0.011–0.014 \text{ см}^3/\text{кг}$ и ПА — 1.1—78, 1—19, 1.1—1.4 (см. рис. 4, *в*).

Формирование максимальных концентраций $\text{H}_2 > 0.6 \text{ см}^3/\text{кг}$ в осадках первого поля в пределах северной части района исследований и Новосибирского бассейна наблюдается в области развития каледонской складчатости фундамента, сквозных структур дробления и систем тектонических нарушений центральной части бассейна. Образование аномальной зоны H_2 ($0.12–0.57 \text{ см}^3/\text{кг}$ и ПА — 12—57) в осадках верхнего горизонта Благовещенской террасы связано с процессами биохимического и миграционного генезиса. Аналогичное положение характерно и для осадков Котельнического поднятия в пределах Южно-Ануйской сутуры, Тастахского бассейна и Бельковско-Святоносского грабенообразного прогиба с

концентрациями H_2 до $0.58–0.76 \text{ см}^3/\text{кг}$ и ПА — 58—76. Максимальные концентрации H_2 в донных осадках газогеохимического поля Чаунской впадины и Айонского бассейна $0.103–0.187 \text{ см}^3/\text{кг}$ (ПА — 10—19) установлены в зонах Чаунского разлома; Медвежинского поднятия (до $0.014 \text{ см}^3/\text{кг}$) — систем субширотных и субмеридиональных нарушений (см. рис. 4, *в*). Следует отметить, что анализ H_2 на станциях 16—19, 23—31, 36—37, 39—41 не производился.

Гелий относится к радиогенному типу миграционных газов, образовавшихся за счет радиоактивного распада на большой глубине и поступивших в донные осадки района по зонам глубинных разломов, крупных нарушений структур сквозного дробления и ТМА. Концентрации гелия в донных осадках района исследований изменяются от 0.0005 до $0.308 \text{ см}^3/\text{кг}$. Исходя из анализа полученных данных и материалов [Гресов и др., 2021; Гресов, Яцук, 2021], к аномалиям Не относятся его концентрации $> 0.0025 \text{ см}^3/\text{кг}$, т. е. значение ПА гелия в осадках достигает 124. Максимальными концентрациями Не $0.104–0.308 \text{ см}^3/\text{кг}$ и ПА 42—124 характеризуются осадки Благовещенской террасы в пределах Южно-Ануйской сутуры.

Донные осадки Северной террасы и северной части Новосибирского бассейна в области каледонской складчатости, структур сквозного дробления и Главного структурного шва характеризуются аномальными концентрациями Не — $0.005–0.08 \text{ см}^3/\text{кг}$ и ПА — 2—32; позднемеловой — в центральной части бассейна — $0.0025–0.041 \text{ см}^3/\text{кг}$ и ПА — 1—16 (см. рис. 4, *в*). Аномальные концентрации Не в осадках Котельнического поднятия, Чаунской впадины и Айонского бассейна составляют $0.005–0.048 \text{ см}^3/\text{кг}$ и ПА — 2—13; Приморского и Пегтымельского бассейнов — $0.004–0.048 \text{ см}^3/\text{кг}$ и ПА —

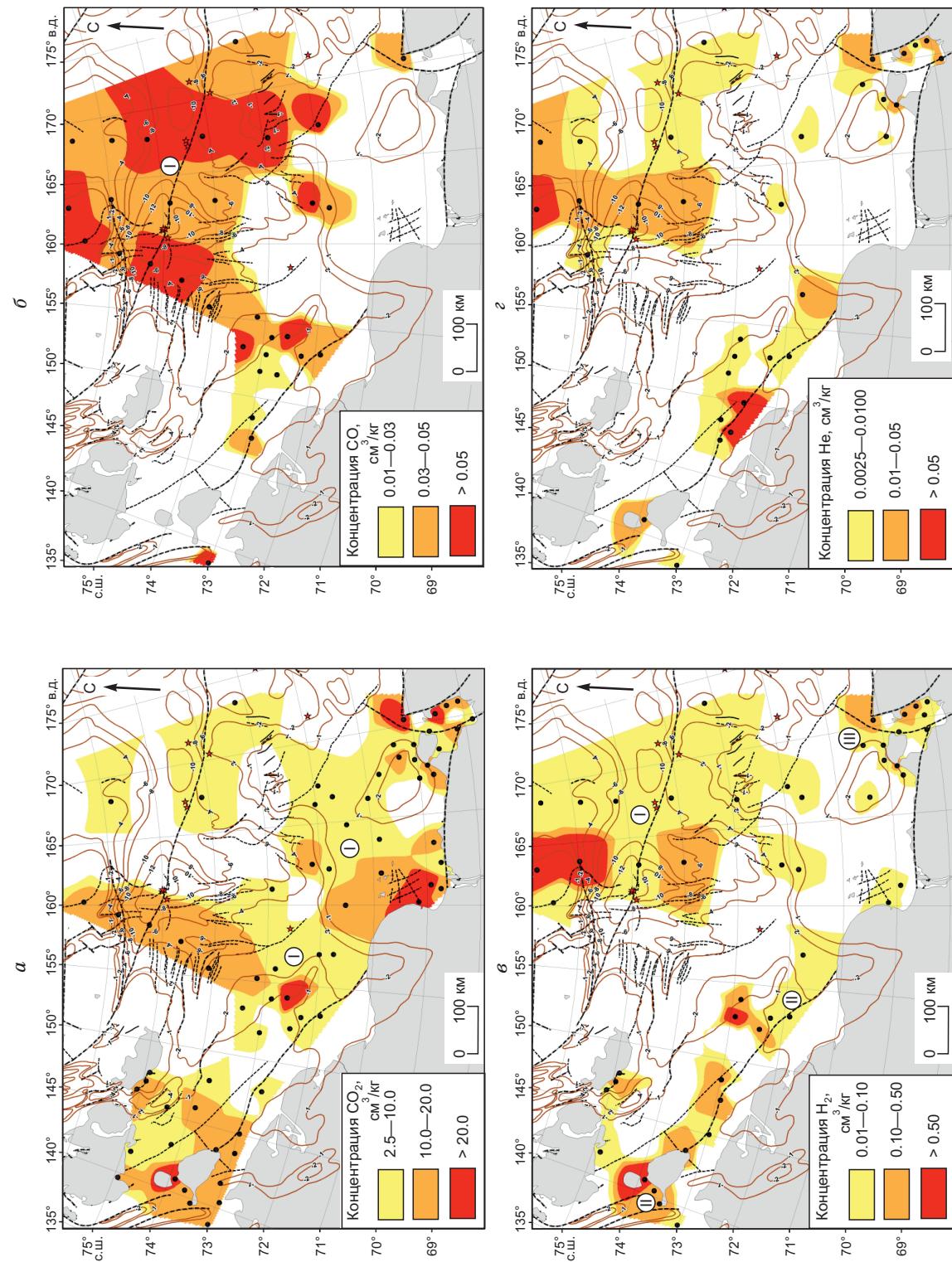


Рис. 4. Распределение аномальных газогеохимических полей углекислового газа (а), оксида углерода (б), водорода (6) и гелия (2) в данных отложениях района исследований.

Усл. обозн. см. на рис. 1.

1.7—13; Бельковско-Святоносского грабенообразного прогиба и Медвежинского поднятия — 0.0025—0.0050 см³/кг и ПА — 1—2.

Образование сероводорода в донных отложениях связано с биохимическими и химическими реакциями. Концентрации H₂S в осадках района исследований, по данным единичных станций, варьируют от 0.08 до 0.92 см³/кг. Максимальные концентрации H₂S — 0.64—0.92 см³/кг установлены в восстановленных осадках Новосибирского бассейна с визуально определенными уплотненными комками черного цвета с аморфными сульфидами железа (гидротроилита) в зонах сульфатредукции, изучение которой в настоящей работе не проводилось.

Происхождение азота и аргона в осадках — атмосферное и глубинное, кислорода — атмосферное, что косвенно подтверждается резким снижением его содержания с увеличением глубины опробования донных отложений района исследований (см. табл. 1). В составе газопроявлений и выбросов газа из скважин, как указывалось ранее, содержания N₂, Ar и O₂ достигают 89.7, 0.5 и 14.7 %; газовой фазы подземных вод — 95.7, 0.2 и 21.7 % соответственно.

Установлено, что формирование и распределение газовых аномалий зависит от комплексного влияния геологических факторов — тектоники, магматизма, угленосности, нефтегазоносности, битумоносности, органической насыщенности и вещественного состава ОВ и УВ, литологического состава, степени катагенеза, водно-физических и коллекторских свойств подстилающих отложений и донных осадков, мощности четвертичных осадков, гидрогеологических, геокриологических и других условий.

Тектономагматический фактор. Тектоническое строение фундамента имеет важное значение в формировании и распределении газовых аномалий в осадках. Максимальные концентрации CO, H₂ и значения их ПА — 6 и 78 установлены в осадках области каледонской складчатости фундамента. Аномальные концентрации CH₄ в этой области отсутствуют (см. рис. 3, а), а значения ПА — УВГ, CO₂ и He до 12, 32, 119 и 124 зафиксированы в осадках области позднемезозойской складчатости, при этом ПА осадков по CO и H₂ достигают 5.8 и 76.

Поскольку условия миграции газов в антиклинальных и синклинальных складках района исследований не одинаковы, характер распределения концентраций ПГ и газовых аномалий в донных отложениях этих складок — различный. В осадках Новосибирского, Приморского, Айонского бассейнов значения ПА CH₄, УВГ, CO₂, CO, H₂ и He на крыльях синклинальных складок достигают 119, 32, 12, 5.3, 63 и 63 соответственно. В донных осадках антиклинальных складок формирование газовых аномалий наблюдается в сводовой части поднятий, где значения ПА CH₄, УВГ, CO₂, CO, H₂ и He достигают 14, 13, 10, 6.0, 76 и 32. В моноклинальных складках Благовещенской террасы значения ПА CH₄, УВГ, CO₂, CO, H₂ и He равны 13, 2.6, 9, 5.1, 57 и 124; Северной террасы — 0.5, 4.3, 2.2, 5.0, 6.5 и 12.4.

Геологическое строение и тектонические условия структурно-тектонической зоны Южно-Ануйской сутуры [Соколов и др., 2015] благоприятствует формированию аномальных зон и газогеохимических полей CH₄, УВГ, CO₂, CO, H₂ и He со значениями ПА — до 14, 3, 8.5, 5.8, 76 и 124. В пределах зоны Главного структурно-тектонического шва аналогичные значения ПА составляют 0.8, 2.6, 7.0, 5.5, 78 и 16. В этой же зоне установлены газовые факелы из донных осадков [Thornton et al., 2020]. Исходя из максимальных концентраций CH₄, УВГ, CO₂, CO, H₂, He в осадках зон их развития 0.040, 0.003, 17.5, 0.055, 0.78, 0.040 см³/кг, в газопроявлениях, вероятно, доминируют CO₂, CO, H₂ и He с примесью CH₄ и УВГ. Данные факты могут указывать на процессы глубинной миграции природных газов.

Дизъюнктивная нарушенность. Разрывные нарушения в зависимости от степени их газопроницаемости являются как путями миграции газов, так и газоупорами, способствующими накоплению ПГ в породных комплексах. Структурно-формационные особенности отложений позволяют предполагать, что продольные складчатости фундамента — разломы — были активными в палеозое, поперечные и диагональные — в мелу—кайнозое. Смещение по разломам кайнозойских отложений, геоморфологические данные и современная сейсмичность района говорят о продолжающихся по ним до настоящего времени движениям и активной роли в процессах миграции газов в донные осадки западного и юго-восточного крыла Новосибирского бассейна с образованием аномальных газогеохимических полей CH₄, УВГ и CO₂, разделенных структурами сквозного дробления и системами продольных нарушений в северной части района исследований и центральной части бассейна. С этими структурами и системами ассоциируется формирование газогеохимических полей, связанных с миграцией глубинных газов — CO₂, CO, H₂ и He. Аналогичное положение отмечается в пределах поднятий и террас района исследований.

В результате магматической деятельности в породы фундамента Новосибирского бассейна привнесено значительное количество магматогенных газов, в том числе CO₂, CO, H₂. Внедрение интрузий сопровождалось формированием нарушений и зон трещиноватости, являющихся не только путями миграции, но и трещинными коллекторами газов. При этом термическое воздействие на ОВ и УВ интрузивных образований является одним из основных факторов возрастания степени катагенеза и увеличения газоносности породных комплексов. На площадях развития магматических образований и разломов центральной части Новосибирского бассейна и поднятий в донных осадках наблюдается формирование

Таблица 3. Средние значения концентраций ПГ донных осадков района исследований на участках развития различных литотипов и газоматеринских источников ($\text{см}^3/\text{кг}$)

Литотип, газоматеринский источник	CH_4	$\sum \text{УВГ}$	CO_2	H_2	He	$\text{O}_2, \%$
Современные осадки*	0.045	0.00005	10.31	0.023	н.о.	10.58
Газогидраты**	1.816	0.0045	8.71	0.012	0.0054	3.99
Торфяники	0.036	0.0004	9.02	0.059	н. о	8.77
Лигниты, бурые угли	0.275	0.0033	8.95	0.077	0.0205	7.85
Каменные угли	0.610	0.0095	9.69	0.047	0.0209	6.57
Кайнозойские газовые залежи	0.151	0.0003	6.00	0.076	н.о.	7.65
Мезозойские газовые залежи**	0.032	0.0011	4.06	0.020	0.0038	6.66
Магматические образования	0.010	0.0003	9.45	0.166	0.0742	9.45
Твердые битумы	0.012	0.0012	3.81	0.244	0.0299	10.16
Конденсатно-газовые залежи**	0.067	0.0045	4.37	0.097	0.0065	7.11
Конденсатные залежи**	0.006	0.0009	2.45	0.396	0.0212	9.01
Нефтегазовые залежи**	0.158	0.0072	8.35	0.021	0.0065	6.92
Газонефтяные залежи**	0.009	0.0025	8.47	0.011	0.0023	6.26

Примечание. Полужирным шрифтом выделены аномальные значения, O_2 менее 10 %.

* Номера донных станций см. табл. 3.

** Предполагаемые источники.

аномальных углекислотно-водородных полей, Южно-Ануйской сутуры — смешанного состава (см. рис. 3, 4). В целом формирование структур ТМА и зон глубинных разломов, транзитно пересекающих породы палеозоя и мезозоя, обусловливают не только блоково-слоистое строение региона, но и благоприятствуют процессам миграции газов в кайнозойский чехол бассейнов, поднятий и террас из газонасыщенных материнских источников.

В процессе работ установлена изменчивость средних концентраций ПГ осадков на участках развития различных литотипов и газоматеринских источников (табл. 3).

Максимумом концентраций CH_4 характеризуются донные осадки Новосибирского бассейна в зонах развития УВГ предполагаемых газогидратных залежей в долинах пра-Индигирки и пра-Алазеи с мощностью четвертичных отложений более 20 м. Максимальные концентрации УВГ в осадках установлены на площадях распространения угленосных формаций, CO_2 , H_2 , He — магматических образований и твердых битумов. Аномальные концентрации сингенетических CH_4 , УВГ, CO_2 в современных осадках наблюдаются на участках с содержанием в них $C_{\text{опр}}$ 1.62—3.24 %; H_2 — с наличием прослоев сапропеля. Исходя из концентраций миграционных CH_4 и УВГ углефикационного ряда торф—лигнит—бурый уголь—каменный уголь 0.04—0.61 $\text{см}^3/\text{кг}$ и 0.0004—0.0095 $\text{см}^3/\text{кг}$ (см. табл. 3), можно сделать вывод о ведущей роли катагенеза гумусового и сапропелитового ОВ в формировании УВ-аномалий в донных осадках района исследований и шельфа ВСМ в целом [Гресов, Яцук, 2021].

Литологический состав донных осадков имеет особое значение в формировании газовых аномалий. С увеличением зернистости отложений наблюдается снижение концентраций ПГ в литологическом ряду пелит—алеврит—псаммит. Увеличение содержаний $C_{\text{опр}}$ в литотипах приводит к нарушению этой тенденции [Гресов и др., 2023]. С возрастанием стадии катагенеза отложений от ПК₁ до МК₃ отмечается резкое увеличение в осадках концентраций H_2 , CH_4 и УВГ. Развитие прослоев глин и аргиллитов, являющихся газоупорами, значительно затрудняет процессы природной диффузии и миграции газов и является факторами накопления ПГ в породных комплексах. В поверхностных донных отложениях аналогичная роль принадлежит тугопластичным пелитам и мерзлым осадкам.

Геокриологические и гидрогеологические условия. Многолетнемерзлые породы и мерзлые донные осадки выполняют роль газоупора и затрудняют процессы природной диффузии и миграции ПГ, «консервируют» имевшиеся газы, снижают газопроницаемость отложений и как следствие способствуют резкому возрастанию концентраций ПГ на границе мерзлота—талика. Установлено, что концентрации CH_4 и УВГ донных осадков (с температурами до +2.0 °C) в зонах развития сквозных таликов в 1.5—8.0 раз превышают их аналоги в мерзлом состоянии [Гресов, Яцук, 2021]. С аналогичным фактом, вероятно, связано формирование факельных газопроявлений в пределах Главного структурно-тектонического шва (см. рис. 1).

В газовой фазе подземных вод содержание CH_4 и УВГ, Не и CO_2 , по данным скважинного опробования, достигает 51.7 и 0.05 %, 0.001 и 25.7 % (скв. 41, 42, см. рис. 1), H_2 и O_2 — 0.5 и 21.7 % (скв. 78),

N_2 — до 95.7 % (скв. 63) на глубинах 26—94 м. Газонасыщенность подземных вод достигает 70 см³/л [Государственная..., 2006]. Данный факт указывает на значительное влияние гидрогеологических условий на газовый баланс верхней части разреза района исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В составе газов пород и донных осадков Новосибирского бассейна и прилегающих геоструктур ВСМ установлены: CH_4 , УВГ, CO_2 , CO, H_2 , He, H_2S , O_2 , N_2 и Ar. Изотопно-газогеохимические показатели $\delta^{13}C$ CO_2 , CH_4 и C_2H_6 , значения M_{UV} , весовых концентраций индивидуальных УВ (C_1 — C_5) и коэффициентов их отношений K_{BL} , K_{pr} свидетельствуют о наличии в осадках как сингенетических, так и эпигенетических ПГ различных газоматеринских источников, в том числе современных осадков, торфяников, углегазоносных и газоносных формаций, твердых битумов, магматических образований и предполагаемых газогидратных, конденсатно-газовых, конденсатных, нефтегазовых, газонефтяных залежей.

В донных отложениях района исследований концентрации CO_2 и CO достигают 29.25 и 0.06 см³/кг, CH_4 и ΣUVG — 5.937 и 0.0318, H_2 и He — 0.781 и 0.318, H_2S — 0.092 см³/кг, что указывает на формирование в осадках газогеохимических аномалий, превышающих пороговые критерии их аномальности в 6—124 раза.

Установлено, что формирование и распределение газовых аномалий зависит от комплексного влияния геологических факторов — тектоники, магматизма, угленосности, нефтегазоносности, битумоносности, органической насыщенности и вещественного состава ОВ, литологического состава, степени катагенеза, водно-физических и коллекторских свойств подстилающих отложений и донных осадков, мощности четвертичных отложений, гидрогеологических, геокриологических и других условий.

Газогеохимические исследования выполнены за счет гранта РНФ № 23-27-00321 «Газонасыщенность донных осадков окраинных морей Евразии: распределение, влияние геологических факторов, особенности генезиса» (<https://rscf.ru/project/23-27-00321/>).

ЛИТЕРАТУРА

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

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.

Государственная геологическая карта РФ. М-б 1:1000 000. Лист S-53—54 (Новосибирские острова). Объяснительная записка. СПб, ВСЕГЕИ, 2006, 208 с.

Государственная геологическая карта РФ. М-б 1:1000 000. Серия Океанская, Лаптево-Сибироморская. Лист Т-57—60. Объяснительная записка. СПб, ВСЕГЕИ, 2015, 84 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:200 000. Серия Анюйско-Чаунская. Лист R-59-XXXI, XXXII. Объяснительная записка. СПб, ВСЕГЕИ, 2016а, 102 с.

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

Гресов А.И. Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока и перспективы ее промышленного освоения. Т. 2. Углеметановые бассейны Республики Саха (Якутия) и Северо-Востока России. Владивосток, Дальнаука, 2012, 468 с.

Гресов А.И., Яцук А.В. Газогеохимические признаки нефтегазоносности юго-восточной части Восточно-Сибирского моря // Геология нефти и газа, 2020, № 4, с. 83—95.

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.

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., 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.

Гресов А.И., Яцук А.В., Аксентов К.И. Литологический состав и углеводородные аномалии донных отложений западной части Восточно-Сибирского моря // Литология и полезные ископаемые, 2023, № 1, с. 1—17.

Гусев Е.А., Рекант П.В., Большиянов 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, № 4, с. 43—55.

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.

Клубов Б.А. Природные битумы Севера. М., Наука, 1983, 205 с.

Малышев Н.А., Обметко В.В., Бородулин А.А., Баринова Е.М., Ихсанов Б.И. Тектоника осадочных бассейнов российского шельфа Чукотского моря // Материалы ХХIII тектонического совещания: «Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя». М., ГИН РАН, 2010, т. 2, с. 23—29.

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.

Соколов С.Д., Тучкова М.И., Ганелин А.В., Бондаренко Г.Е., Лейер П. Тектоника Южно-Ануйской сутуры (Северо-Восток Азии) // Геотектоника, 2015, № 1, с. 5—30.

Фандюшкин Г.А. Закономерности углеобразования на Северо-Востоке России. Губкин, ОАО «Губкинская типография», 2006, 344 с.

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 // Mar. Pet. Geol., 2005, v. 22 (4), p. 457—477.

Astakhov A.S., Sattarova V.V., Shi Xuefa, Hu Limin, Aksentov K.I., Alatortsev A.V., Kolesnik O.N., Mariash A.A. Distribution and sources of rare earth elements in sediments of the Chukchi and East Siberian Seas // Polar Sci., 2019, v. 20, p. 148—159.

Stein R., Matthiessen J., Niessen F., Krylov A., Seung-il Nam, Bazhenova E. Towards a better (litho-) stratigraphy and reconstruction of Quaternary paleoenvironment in the Amerasian Basin (Arctic Ocean) // Polarforschung, 2009, v. 79, p. 97—121.

Thornton B.F., Prytherch J., Andersson K., Brooks I.M., Salisbury D., Tjernström M., Crill P.M. Shipborne eddy covariance observations of methane fluxes constrain Arctic sea emissions // Sci. Adv., 2020, v. 6, eaay7934.

Yatsuk A.V., Gresov A.I., Snyder G.T. Hydrocarbon gases in seafloor sediments of the edge shelf zone of the East Siberian Sea and adjacent part of the Arctic Ocean // Front. Earth Sci., 2022, v. 10, 856496.