

УДК 553.98:550.84

ЛИТОЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ И УГЛЕВОДОРОДНЫЕ АНОМАЛИИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

© 2023 г. А. И. Гресов^а, *, А. В. Яцук^а, **, К. И. Аксентов^а

^аТихоокеанский океанологический институт им В.И. Ильичёва ДВО РАН,
ул. Балтийская, 43, Владивосток, 690041 Россия

*e-mail: gresov@poi.dvo.ru

**e-mail: yatsuk@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 25.05.2022 г.

После доработки 07.06.2022 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

На основе литолого-газогеохимических исследований и комплексной интерпретации имеющихся материалов обобщены и проанализированы основные факторы формирования и распределения гранулометрического состава, водно-физических свойств, органической насыщенности, концентраций и геохимических показателей углеводородных газов донных отложений геоструктур западной части Восточно-Сибирского моря. Установлено, что осадки северной и центральной части района исследований представлены алевроитопелитами, южной — алевроитопелит-псаммитами с вариациями показателей C_{org} — 0.6–2.0%, естественной влажности и плотности — 18–43% и 1.5–2.0 г/см³, открытой пористости — 17–33%, концентраций метана и его гомологов — 0.001–5.934 и 0.00003–0.0312 см³/кг, молекулярной массы УВ-фракции, коэффициентов “влажности”, “сухости” и преобразованности УВ-фракции 16.05–22.6 г/моль, 0.2–51%, 1–1999, 0.2–50.8 и $\delta^{13}C-CH_4$ (–82.7...–38.4‰). Исходя из значений газогеохимических показателей, в донных отложениях выделено одиннадцать типов газоматеринских источников. В процессе исследований установлено, что формирование УВ-аномалий в осадках связано в основном с их коллекторскими свойствами, содержаниями C_{org} и глубинами их опробования, а также с комплексным влиянием геологических факторов, основными из которых являются газонасыщенность подстилающих отложений и тип газоматеринского источника, разрывная и пликтивная тектоника, геоструктурное положение, мощность четвертичных отложений, угленефтегазоносность и возраст складчатого основания. В меньшей мере аномалии углеводородных газов связаны с литологическим составом и плотностными показателями осадков.

Ключевые слова: донные осадки, литолого-газогеохимические исследования, углеводородные газы, Восточно-Арктический шельф.

DOI: 10.31857/S0024497X23010020, **EDN:** GWTGOV

Процессы седиментогенеза в Восточно-Сибирском море (ВСМ) сопровождаются накоплением органического вещества (ОВ), преобразование которого предопределяет образование обогащенных органикой газонасыщенных осадков с доминированием на первых стадиях их диагенеза сингенетических углеводородных газов (УВГ) с формированием в ряде случаев УВ-аномалий¹. Установлено, что литологический состав и водно-физические свойства донных отложений являются одним из основных факторов аккумуляции УВГ². Согласно существующим представле-

ниям о наличии фильтрационно-диффузионного и миграционного механизма вертикального газопереноса в перекрывающие их отложения [Старобинец и др., 1993; Abrams, 2005, 2017], в донных отложениях происходят процессы смешивания сингенетических и миграционных (эпигенетических) УВГ подстилающих геологических образований. Данные процессы в ряде случаев осложнены влиянием глубинной флюидодинамики и сопровождаются изменениями литолого-газогеохимического состава донных отложений с формированием в последних аномальных газогеохимических полей [Флюидодинамика ..., 1989; Геология ..., 2004; Яшин, Ким, 2007; Шакиров и др., 2013; Гресов и др., 2017; Гресов, Яцук, 2020; Соколов и др., 2020; Гресов, Яцук, 2021; Гусев и др., 2021].

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

² Строение, вещественный состав и геохимия донных отложений Арктических акваторий СССР // Отчет о НИР / Яшин Д.С. Л.: ВНИИОкеангеология, 1985.

Исходя из изложенного, была поставлена задача оценки пространственно-временной изменчивости литологических, водно-физических и газогенетических показателей донных отложений западной части Восточно-Сибирского моря (ВСМ) на участках формирования УВ-аномалий. Актуальность поставленной задачи обусловлена не только слабой изученностью района исследований, но и государственным приоритетом научных работ в Арктической зоне Российской Федерации.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Основным материалом литолого-газогеохимических исследований являлись керны осадков пятидесяти четырех донных станций (рис. 1, табл. 1), отобранные грунтоотборными трубками и мультикорами в период проведения российско-китайских экспедиций на НИС “Академик М.А. Лаврентьев” LV-77 (В.В. Калининчук, 2016), LV-83 и LV-90 (А.В. Яцук, 2018, 2020)³, а также с попутных судов Мурманского (О.Н. Кулешова, И.П. Федоров, О.В. Кириллов, И.А. Алексеев, 1977, 1980)^{1, 2}, Дальневосточного (В.Г. Карпенюк, А.И. Гресов, 2009, 2010, 2012, 2014 гг.)³ пароходств ММФ и прибрежных экспедиций (А.И. Гресов, Ю.П. Пензин, А.С. Филимонов, А.В. Курьянов, 1979, 1980, 1982, 1985)⁴.

В ходе морских экспедиционных работ колонки кернов после подъема на борт судна разделялись на две равные части, одна использовалась для опробования, а другая — для литологического описания и фотографирования. Для проведения стационарных аналитических исследований керны хранились в кернохранилище. Изучение состава газов донных отложений осуществлялось методами поинтервального отбора осадков в герметические сосуды с последующей их дегазацией и отбором проб газа при свободной, термической и термовакуумной стадии выделения.

Хроматографический анализ проб газа проводился в аттестованных Росстандартом газоаналитической лаборатории ООО “Дальвостуглеразведка” и лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН на хроматографах ЛХМ 8МД, Газохром 3101, “Хроматэк-Газохром 2000” (ЗАО СКБ Хроматэк, Россия) и “КристалЛюкс-4000М” (ООО “НПФ

“Мета-хром”, Россия). Методика опробования, дегазации осадков, анализа газов и обработки полученных данных соответствовала действующему руководству [Руководство ..., 1985], ГОСТ 23781-79, 83, 87⁵, ГОСТ 31371.3-2008⁶ и нормативным паспортам вышеуказанных лабораторий.

Изучение гранулометрического состава и водно-физических свойств донных осадков осуществлялось в лаборатории геохимии осадочных процессов ТОИ ДВО РАН (К.И. Аксентовым). 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); содержание органического и неорганического углерода — методом ИК-детектирования на анализаторе TOC-V (Shimadzu, Япония) в аккредитованной лаборатории аналитической химии ДВГИ ДВО РАН (Н.В. Зарубина).

Для определения генезиса УВГ использовались данные масс-спектрометрии изотопных отношений (IRMS) $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$, $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_2\text{H}_6$ и $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ [Гресов и др., 2016, 2020, 2021], установленные в лабораториях стабильных изотопов МГРИ, ВСЕГИИ и ДВГИ на масс-спектрометрах Finnigan MAT-253, Deltaplus XL, выполненные по аттестованным и оптимизированным для исследований методикам [Velivetskaya et al., 2015].

Оцифровка и пространственно-математическая интерпретация результатов работы проводилась в программном комплексе ESRI®ArcGIS с помощью модуля Geostatistical Analyst по методу обратных взвешенных расстояний (IDW). Статистическая обработка результатов выполнена с использованием программного пакета “STATISTICA” 10.0.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

В геологическом строении района исследований принимают участие осадочные и вулканогенные образования палеозойского, мезозойского и кайнозойского возраста. Северная часть Новосибирского осадочного бассейна (около 25% его площади) характеризуется более широким возрастным объемом осадочного чехла: от верхнего палеозоя до кайнозоя, залегающего на каледонском складчатом основании. В южной части Новосибирского бассейна возрастной объем осадочного чехла определяется в пределах апта-кай-

³ Геологические условия формирования аномальных парагенетических углеводородных и геохимических ассоциаций в донных отложениях Восточно-Сибирского моря и прилегающего российского сектора Северного Ледовитого океана // Отчет о НИР / Гресов А.И., Яцук А.В. М.: РФФИ, ТОИ ДВО РАН, 2021.

⁴ Изучение изменчивости распределения природных газов в угленосных толщах с целью разработки рекомендаций по повышению достоверности и газобезопасности геологоразведочных работ // Отчет о НИР / Гресов А.И. Т. 1, 2, 3. М.: ВГФ, Владивосток: ПГФ, Дальвостуглеразведка, 1987.

⁵ Газы горючие природные. Хроматографический метод определения компонентного состава. М.: Госстандарт, 1979. 8 с.; 1983. 11 с.; 1987. 11 с.

⁶ Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. М.: Стандартинформ, 2009. 16 с.

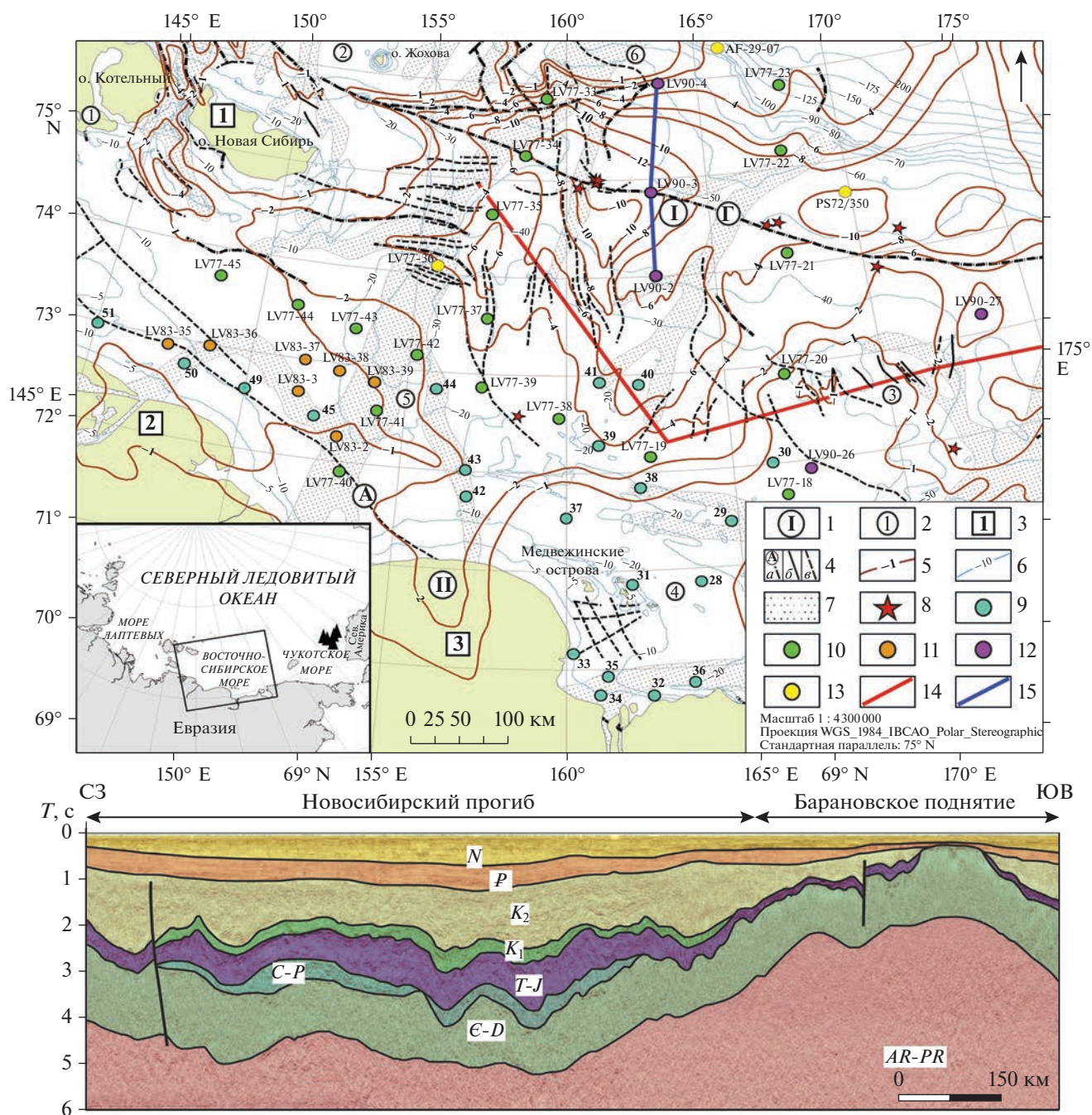


Рис. 1. Структурно-тектоническая карта [Государственная ..., 1999, 2006а, б, в, 2016] и сейсмогеологический разрез [Ступакова и др., 2017] района исследований.

1 – прогибы (осадочные бассейны): I – Новосибирский, II – Приморский; 2 – геоструктуры (1–4 – поднятия: 1 – Котельническое, 2 – Лонга, 3 – Барановское, 4 – Медвежинское; 5, 6 – структурные террасы: 5 – Благовещенская, 6 – Северная); 3 – угленосные бассейны и площади (1 – Анжуйский, 2 – Хромская, 3 – Приморская); 4 – разломы (а – А – Анжуйский, Г – главный структурный шов; б, в – тектонические нарушения: б – установленные, в – предполагаемые); 5 – изогипсы мощности осадочного чехла, км; 6 – изобаты, м [Jakobsson et al., 2012]; 7 – палеodelьты рек [Геология ..., 2003]; 8 – газовые факелы [Thornton et al., 2020]; 9–13 – донные станции и их номера (9 – прибрежных экспедиций и попутного судового опробования, 10 – рейса LV-77, 11 – LV-83, 12 – LV-90, 13 – определения возраста осадков); 14 – сейсмогеологический разрез; 15 – литологический разрез.

На врезке: расположение района исследований и нефтегазовых месторождений шельфа Аляски.

Таблица 1. Характеристика опробования и изученные показатели донных отложений

Номер станции. Метод отбора**	Глубина моря, м	Длина керна, см	Интервал, см	Изученные показатели*
LV90-2, 3, 4, 27. ГОТ	42–45	125–252	5–40 40–100 100–200 200–250	ГС, ВФС, ТОС, ДГ, СГ, ГН, ИС – LV90-2
LV90-26. МК	22	43	30 35 40	ГС, ВФС, ТОС, ДГ, СГ, ГН, ИС
LV83-4, 38. МК	17–18	35–37	30	ГС, ВФС, ТОС, ДГ, СГ, ГН
LV83-39. ГОТ	27	140	40 50–100 100–130	ГС, ВФС, ТОС, ДГ, СГ, ГН
LV83-2, 3, 35, 36, 37. МК	8–15	25–38	15–20 30	ТОС, ДГ, СГ, ГН
LV77-18, 19, 20, 21, 22, 23. ГОТ	22–138	70–260	20–30 40–100 100–200 200–250	ГС, ВФС, ТОС, ДГ, СГ, ГН, ИС
LV77-33, 34, 35, 36, 40, 41, 42, 43. ГОТ	14–46	110–386	5–40 40–100 100–200 200–300 300–380	ГС, ВФС, ТОС, ДГ, СГ, ГН, ИС
LV77-37, 38, 39, 44, 45. МК	12–26	25–37	20 30	ГС, ВФС, ТОС
29, 30, 34, 37, 38, 42, 43, 45, 49, 51. ГОТ	8–35	60–220	30 40–100 100–200 205–215	ГС, ВФС, ТОС, ДГ, СГ, ГН, ИС
28, 31, 33, 35, 36, 39, 40, 41, 44, 50. ГОТ	7–34	65–140	40 40–100 100–130	ТОС, ДГ, СГ, ГН
32, 34. ГОТ	7–8	35–38	30–35	ГС, ВФС, ТОС, ДГ, СГ, ГН

Примечания. * – ГС – гранулометрический состав, ВФС – водно-физические свойства, ТОС – органический и неорганический углерод, ДГ – дегазационные показатели, СГ – состав газа, ГН – газонасыщенность, ИС – изотопный состав углерода $\delta^{13}\text{C}$ газов; ** – методы отбора керна: ГОТ – грунтоотборная трубка, МК – мультитор.

нозоя, залегающих на позднемезозойском основании Новосибирско-Чукотской складчатой системы, в строении которой выделяются терригенно-карбонатный комплекс нижнего–среднего палеозоя и терригенный комплекс верхнего палеозоя–нижнего мела (см. рис. 1). С первым комплексом ассоциируется базитовый магматизм в виде даек и штоков метадолеритов и метагаббро-долеритов, со вторым – гранитоидный магматизм раннемелового возраста. Среди разрывных

нарушений в складчатом основании северной части района исследований выделяется Главный структурный шов (граница областей позднемезозойской и докембрийско-каледонской складчатости), в южной части – Анюйский разлом. Западная часть бассейна осложнена нарушениями субширотного простиранья, центральная – субмеридионального. Кайнозойский осадочный комплекс, сложенный песчаниками, алевролитами, аргиллитами, конгломератами, глинами, алевролитами,

песками и галечниками, характеризуется отсутствием нарушений [Государственная ..., 1999, 2006а, б]. Основными источниками поступления терригенного материала и формирования осадков района исследований являются продукты береговой и донной абразии, твердый сток рек Хромы, Индигирки, Алазеи и Колымы. Ледовый перенос в процессе образования осадков имеет второстепенное значение [Геология ..., 2004; Государственная ..., 1999, 2006а, б, в].

Возраст голоценовых осадков северо-восточной части района исследований (станция PS72/350-2, см. рис. 1) на глубине опробования 109 см (по данным AMS ^{14}C) составляет 9319 лет (cal a BP), 163 см – 9496, 208 см – 10314 лет [Stein et al., 2017]. В юго-западной части аналогичные показатели на глубине опробования 12 см (станция LV77-36, см. рис. 1) составляют 751 лет, 36 см – 2065, 60 см – 2847, 80 см – 3552, 92 см – 4242, 322 см – 8082 и 354 см – 8192 лет [Astakhov et al., 2019]. Возраст плейстоценовых осадков станции 20GC, расположенной севернее района исследований на поднятии Лонга, составляет в сегменте керна 54–60 см – 12.04 тыс. лет, 72–81 см – 12.52–13.21 тыс. лет [O'Regan et al., 2017]. По данным [Гусев и др., 2013] верхние 47 см осадков станции АФ-29-07 (см. рис. 1) представлены голоценовыми алевритопелитами, нижние – 47–191 см – твердыми пелитами, возраст которых в интервале 47–52 см (по данным метода избыточного ^{230}Th) составляет 181 тыс. лет. Радиоуглеродный анализ пелитовых осадков на глубине опробования 130 см показал запредельную датировку их возраста >44 тыс. лет [Гусев и др., 2013].

Органическая насыщенность отложений района исследований достаточно высокая. В палеозой-мезозойских породах установлены твердые битумы, углистые сланцы и аргиллиты с содержанием $S_{\text{орг}}$ до 6–34%. В Анжуйском угленосном бассейне (см. рис. 1) установлено до 9 нижнемеловых пластов каменного угля мощностью до 25.0 м и 8–10 пластов бурого угля верхнемелового–палеогенового возраста общей мощностью до 46 м. В эоцен–миоценовых отложениях Тастахской, Хромской, Приморской и Чаунской угленосных площадей установлено более 90 пропластков и пластов бурого угля общей мощностью более 100 м. Содержание $S_{\text{орг}}$ в углях составляет 64–81%. Метаноносность пластов каменного угля на глубинах их залегания 200 м достигает $4 \text{ м}^3/\text{т}$, бурого угля – $1\text{--}2 \text{ м}^3/\text{т}$ [Клубов, 1983; Государственная ..., 2006а; Гресов, 2012; Гресов, Яцук, 2021].

В пределах континентального, островного обрамления и акваториальной части района исследований установлены газопроявления из скважин с содержанием CH_4 и его гомологов до 95 и 0.01% и газовые “факела” из газонасыщенных донных отложений в тектонических зонах [Яшин,

Ким, 2007; Thornton et al., 2020, Рябчук и др., 2020; Гресов, Яцук, 2021].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Литологический состав осадков

Основная часть Новосибирского и Приморского осадочного бассейна, Благовещенской террасы, Барановского и Медвежинского поднятий покрыта восстановленными серыми, темно-серыми или черными осадками. Часто в осадках отмечается запах сероводорода и уплотненные комки черного цвета с аморфными сульфидами железа (гидротроилита). Окисленные светло коричневые, коричневые, бурые и зеленоватые осадки появляются лишь в осадках верхней части разреза донных отложений северной части района исследований (станции LV77-23, LV77-33 и LV90-4).

Максимальные содержания псаммитовой фракции (до 33.5%) установлены в осадках прибрежной части района исследований и Медвежинского поднятия, минимальные – менее 0.1% – северной части Новосибирского бассейна и восточной – Благовещенской террасы, промежуточные – 1–10% – южных частей Новосибирского бассейна, террасы и Барановского поднятия, а также Приморского осадочного бассейна в целом (см. рис. 1, табл. 2). Каменный материал в осадках района исследований представлен незначительным объемом гравия и гальки менее 1% и повторяет характер распределения псаммитовой фракции.

Минимальным содержанием алевритовой фракции 33–36% характеризуются донные осадки северо-восточного крыла Новосибирского бассейна и южной части Медвежинского поднятия, максимальными – 62–65% – северной части Приморского бассейна, южной – Барановского поднятия и центральной – Новосибирского бассейна; промежуточными значениями – остальная площадь района исследований. Максимальное содержание пелитовой фракции (более 55%) установлено в донных отложениях северной части Новосибирского бассейна (станции LV77-22, LV77-23, LV77-33; LV90-3, LV90-4) в пределах нижнего горизонта опробования осадков (рис. 2), минимальное содержание менее 30% – в верхнем и среднем горизонтах Медвежинского поднятия (станции 33, 34) и Приморского бассейна (станция 42), промежуточные показатели – на остальной площади района исследований (см. табл. 2).

Водно-физические свойства и биогенные компоненты

Показатели естественной влажности донных отложений осадочных бассейнов изменяются в пределах 18–47%, террасы и поднятий – 20–43%. Установлена закономерность ее уменьшения с

Таблица 2. Литолого-газогеохимические показатели донных отложений осадочных бассейнов и геоструктур района исследований

Показатели	Значения литологических, водно-физических и газогеохимических показателей донных отложений по интервалам опробования, см				
	20–40	40–100	100–200	200–300	300–400
1	2	3	4	5	6
Новосибирский осадочный бассейн					
Pl, %*	$\frac{35.5-43.8^{**}}{40.0 (4)^{***}}$	$\frac{38.3-51.2}{45.1 (9)}$	$\frac{39.3-64.0}{49.0 (15)}$	$\frac{37.0-59.8}{50.6 (6)}$	$\frac{48.7-57.8}{53.2 (2)}$
A, %	$\frac{56.2-64.5}{59.6 (4)}$	$\frac{48.8-61.7}{54.7 (9)}$	$\frac{36.0-60.2}{50.1 (15)}$	$\frac{40.0-65.3}{49.7 (6)}$	$\frac{42.2-50.5}{48.4 (2)}$
Ps, %	$\frac{0-1.7}{0.4 (4)}$	$\frac{0-1.0}{0.3 (9)}$	$\frac{0.0-9.4}{0.9 (15)}$	$\frac{0.0-3.7}{0.7 (6)}$	$\frac{0-0.8}{0.4 (2)}$
Wo, %	$\frac{30.0-39.0}{35.5 (4)}$	$\frac{29.1-39.1}{33.0 (9)}$	$\frac{22.1-38.9}{32.3 (15)}$	$\frac{18.2-36.5}{30.3 (6)}$	$\frac{24.1-25.0}{24.5 (2)}$
Do, г/см ³	$\frac{1.63-1.82}{1.69 (4)}$	$\frac{1.62-1.86}{1.71 (9)}$	$\frac{1.63-1.99}{1.79 (15)}$	$\frac{1.70-1.98}{1.81 (6)}$	$\frac{1.78-1.82}{1.80 (2)}$
D сух., г/см ³	$\frac{1.00-1.28}{1.10 (4)}$	$\frac{1.01-1.24}{1.14 (9)}$	$\frac{0.98-1.51}{1.20 (15)}$	$\frac{1.11-1.52}{1.22 (6)}$	$\frac{1.16-1.24}{1.20 (2)}$
Ko, %	$\frac{19.0-24.9}{23.0 (4)}$	$\frac{22.3-29.8}{25.3 (9)}$	$\frac{22.0-33.0}{26.4 (15)}$	$\frac{26.9-33.0}{28.8 (6)}$	$\frac{32.6-32.8}{32.7 (2)}$
C _{орг} , %	$\frac{0.90-1.36}{1.15 (4)}$	$\frac{0.64-1.17}{0.91 (9)}$	$\frac{0.70-1.16}{0.93 (15)}$	$\frac{0.82-1.04}{0.92 (6)}$	$\frac{1.02-1.06}{1.04 (2)}$
C _{карб} , %	$\frac{0.03-0.06}{0.04 (4)}$	$\frac{0.01-0.08}{0.03 (9)}$	$\frac{0.01-0.16}{0.06 (15)}$	$\frac{0.01-0.09}{0.03 (6)}$	$\frac{0.02-0.03}{0.02 (2)}$
CH ₄ , см ³ /кг	$\frac{0.0017-0.0050}{0.0027 (4)}$	$\frac{0.003-0.0404}{0.0106 (9)}$	$\frac{0.0024-2.0973}{0.1575 (15)}$	$\frac{0.015-0.1199}{0.0691 (6)}$	$\frac{2.9054-5.9371}{4.4187 (2)}$
ΣC ₂ –C ₅ , см ³ /кг	$\frac{0.0002-0.0003}{0.00025 (4)}$	$\frac{0.00024-0.0026}{0.00095 (9)}$	$\frac{0.00023-0.0312}{0.00379 (15)}$	$\frac{0.0003-0.0155}{0.0046 (6)}$	$\frac{0.0055-0.0134}{0.0094 (2)}$
CO ₂ , см ³ /кг	$\frac{0.43-4.03}{1.84 (4)}$	$\frac{0.68-17.45}{3.51 (9)}$	$\frac{0.58-14.82}{4.61 (15)}$	$\frac{1.86-22.72}{9.09 (6)}$	$\frac{13.84-19.19}{16.51 (2)}$
Приморский осадочный бассейн					
Pl, %	$\frac{37.0}{37.0}$	н. д.	$\frac{29.0-39.8}{34.4 (2)}$	$\frac{39.2}{39.2}$	н. д.
A, %	$\frac{59.3}{59.3}$	н. д.	$\frac{59.1-61.6}{60.3 (2)}$	$\frac{50.6}{50.6}$	н. д.
Ps, %	$\frac{3.7}{3.7}$	н. д.	$\frac{2.1-9.4}{5.6 (2)}$	$\frac{10.2}{10.2}$	н. д.
Wo, %	$\frac{34.0}{34.0}$	н. д.	$\frac{31.0}{31.0}$	$\frac{21.8}{21.8}$	н. д.

Таблица 2. Продолжение

Показатели	Значения литологических, водно-физических и газогеохимических показателей донных отложений по интервалам опробования, см				
	20–40	40–100	100–200	200–300	300–400
1	2	3	4	5	6
Do, г/см ³	$\frac{1.87}{1.87}$	н. д.	$\frac{1.90}{1.90}$	$\frac{2.02}{2.02}$	н. д.
D сух., г/см ³	$\frac{1.30}{1.30}$	н. д.	$\frac{1.30}{1.30}$	$\frac{1.54}{1.54}$	н. д.
Ko, %	$\frac{23.0}{23.0}$	н. д.	$\frac{26.0}{26.0}$	$\frac{27.2}{27.2}$	н. д.
C _{орг} , %	$\frac{1.34}{1.34}$	н. д.	$\frac{1.02-1.32}{1.15 (2)}$	$\frac{0.92}{0.92}$	н. д.
C _{карб} , %	$\frac{0.05}{0.05}$	н. д.	$\frac{0.12-0.16}{0.14 (2)}$	$\frac{0.05}{0.05}$	н. д.
CH ₄ , см ³ /кг	$\frac{0.0065}{0.0065}$	н. д.	$\frac{0.0362-0.0560}{0.0461 (2)}$	$\frac{0.2260}{0.2260}$	н. д.
ΣC ₂ –C ₅ , см ³ /кг	$\frac{0.00025}{0.00025}$	н. д.	$\frac{0.00494-0.0088}{0.00687 (2)}$	$\frac{0.03090}{0.03090}$	н. д.
CO ₂ , см ³ /кг	$\frac{3.95}{3.95}$	н. д.	$\frac{7.24-8.60}{7.92 (2)}$	$\frac{8.63}{8.63}$	н. д.
Барановское и Медвежинское поднятия					
Pl, %	$\frac{19.4-45.8}{35.0 (7)}$	$\frac{37.0-49.0}{41.2 (4)}$	$\frac{39.1-50.0}{44.5 (2)}$	н. д.	н. д.
A, %	$\frac{33.7-63.9}{55.1 (7)}$	$\frac{50.0-62.2}{57.3 (4)}$	$\frac{50.0-51.6}{50.7 (2)}$	н. д.	н. д.
Ps, %	$\frac{0.04-33.5}{9.9 (7)}$	$\frac{0.8-3.0}{1.5 (4)}$	$\frac{0.21-9.4}{4.8 (2)}$	н. д.	н. д.
Wo, %	$\frac{21.6-43.2}{28.0 (7)}$	$\frac{25.4-28.7}{27.0 (4)}$	$\frac{20.1-26.4}{23.2 (5)}$	н. д.	н. д.
Do, г/см ³	$\frac{1.58-2.12}{1.90 (7)}$	$\frac{1.69-1.86}{1.80 (4)}$	$\frac{1.81-1.92}{1.86 (2)}$	н. д.	н. д.
D сух., г/см ³	$\frac{0.91-1.67}{1.40 (7)}$	$\frac{1.18-1.36}{1.29 (4)}$	$\frac{1.29-1.42}{1.36 (2)}$	н. д.	н. д.
Ko, %	$\frac{17.0-24.6}{22.4 (7)}$	$\frac{22.3-26.5}{24.8 (4)}$	$\frac{25.6-29.9}{27.8 (2)}$	н. д.	н. д.
C _{орг} , %	$\frac{1.28-1.90}{1.53 (7)}$	$\frac{0.73-1.49}{1.29 (6)}$	$\frac{0.91-1.45}{1.28 (2)}$	н. д.	н. д.
C _{карб} , %	$\frac{0.03-0.16}{0.07 (7)}$	$\frac{0.03-0.08}{0.06 (6)}$	$\frac{0.03-0.09}{0.05 (5)}$	н. д.	н. д.

Таблица 2. Окончание

Показатели	Значения литологических, водно-физических и газогеохимических показателей донных отложений по интервалам опробования, см				
	20–40	40–100	100–200	200–300	300–400
1	2	3	4	5	6
CH ₄ , см ³ /кг	$\frac{0.0036-0.0301}{0.0134}$ (7)	$\frac{0.0034-0.1380}{0.0473}$ (6)	$\frac{0.0216-0.576}{0.2807}$ (5)	н. д.	н. д.
ΣC ₂ –C ₅ , см ³ /кг	$\frac{0.00003-0.0047}{0.00097}$ (7)	$\frac{0.00009-0.0018}{0.00098}$ (6)	$\frac{0.0001-0.00043}{0.00025}$ (5)	н. д.	н. д.
CO ₂ , см ³ /кг	$\frac{1.43-12.44}{4.89}$ (7)	$\frac{2.09-14.72}{6.04}$ (6)	$\frac{5.28-23.80}{14.95}$ (5)	н. д.	н. д.
Благовещенская структурная терраса					
Pl, %	$\frac{37.6-52.2}{42.7}$ (3)	$\frac{37.2-49.5}{43.4}$ (2)	$\frac{44.8-49.6}{47.1}$ (3)	$\frac{37.0-52.7}{43.0}$ (3)	н. д.
A, %	$\frac{40.6-62.3}{54.9}$ (3)	$\frac{50.5-62.7}{56.6}$ (2)	$\frac{50.4-55.2}{52.3}$ (3)	$\frac{50.4-55.2}{52.3}$ (3)	н. д.
Ps, %	$\frac{0.01-7.2}{2.4}$ (3)	$\frac{0-0.04}{0.02}$ (2)	$\frac{0-1.64}{0.6}$ (3)	$\frac{0.3-10.2}{4.7}$ (3)	н. д.
Wo, %	$\frac{32.1-38.0}{35.3}$ (3)	$\frac{30.0-37.0}{33.5}$ (2)	$\frac{27.4-33.0}{30.1}$ (3)	$\frac{18.2-27.2}{22.4}$ (3)	н. д.
Do, г/см ³	$\frac{1.60-2.00}{1.76}$ (3)	$\frac{1.66-1.80}{1.73}$ (2)	$\frac{1.70-1.79}{1.74}$ (3)	$\frac{1.96-2.02}{1.98}$ (3)	н. д.
D сух., г/см ³	$\frac{1.00-1.40}{1.17}$ (3)	$\frac{1.04-1.24}{1.14}$ (2)	$\frac{1.15-1.23}{1.18}$ (3)	$\frac{1.46-1.54}{1.50}$ (3)	н. д.
Ko, %	$\frac{22.0-24.2}{23.3}$ (4)	$\frac{23.8-26.2}{24.9}$ (2)	$\frac{25.6-26.0}{25.8}$ (3)	$\frac{25.2-27.8}{26.4}$ (3)	н. д.
C _{орг} , %	$\frac{1.34-2.02}{1.61}$ (9)	$\frac{1.40-1.42}{1.41}$ (2)	$\frac{0.74-1.32}{1.06}$ (5)	$\frac{0.64-0.92}{0.82}$ (3)	н. д.
C _{карб} , %	$\frac{0.03-0.11}{0.06}$ (9)	$\frac{0.03-0.04}{0.04}$ (2)	$\frac{0.01-0.11}{0.04}$ (5)	$\frac{0.01-0.05}{0.03}$ (3)	н. д.
CH ₄ , см ³ /кг	$\frac{0.0012-0.0080}{0.0038}$ (9)	$\frac{0.0061-0.091}{0.0076}$ (2)	$\frac{0.0071-0.5378}{0.1256}$ (5)	$\frac{0.0499-0.3486}{0.2082}$ (3)	н. д.
ΣC ₂ –C ₅ , см ³ /кг	$\frac{0.00003-0.0004}{0.00029}$ (9)	$\frac{0.0003-0.0004}{0.00034}$ (2)	$\frac{0.0003-0.00142}{0.00187}$ (5)	$\frac{0.0080-0.0309}{0.02161}$ (3)	н. д.
CO ₂ , см ³ /кг	$\frac{0.14-13.04}{3.61}$ (9)	$\frac{0.74-3.93}{2.33}$ (2)	$\frac{1.14-10.07}{4.87}$ (5)	$\frac{2.82-22.72}{11.39}$ (3)	н. д.

Примечание. * – Pl, A, Ps – пелит, алевроит, псаммит, Wo и Do – влажность и плотность осадка в естественных условиях, Dс – плотность осадка в сухом состоянии, Ko – открытая пористость; ** – минимум–максимум/среднее (***) – число случаев определения всех показателей; н. д. – нет данных. Красным цветом выделены аномальные концентрации углекислого газа, метана и суммы его гомологов.

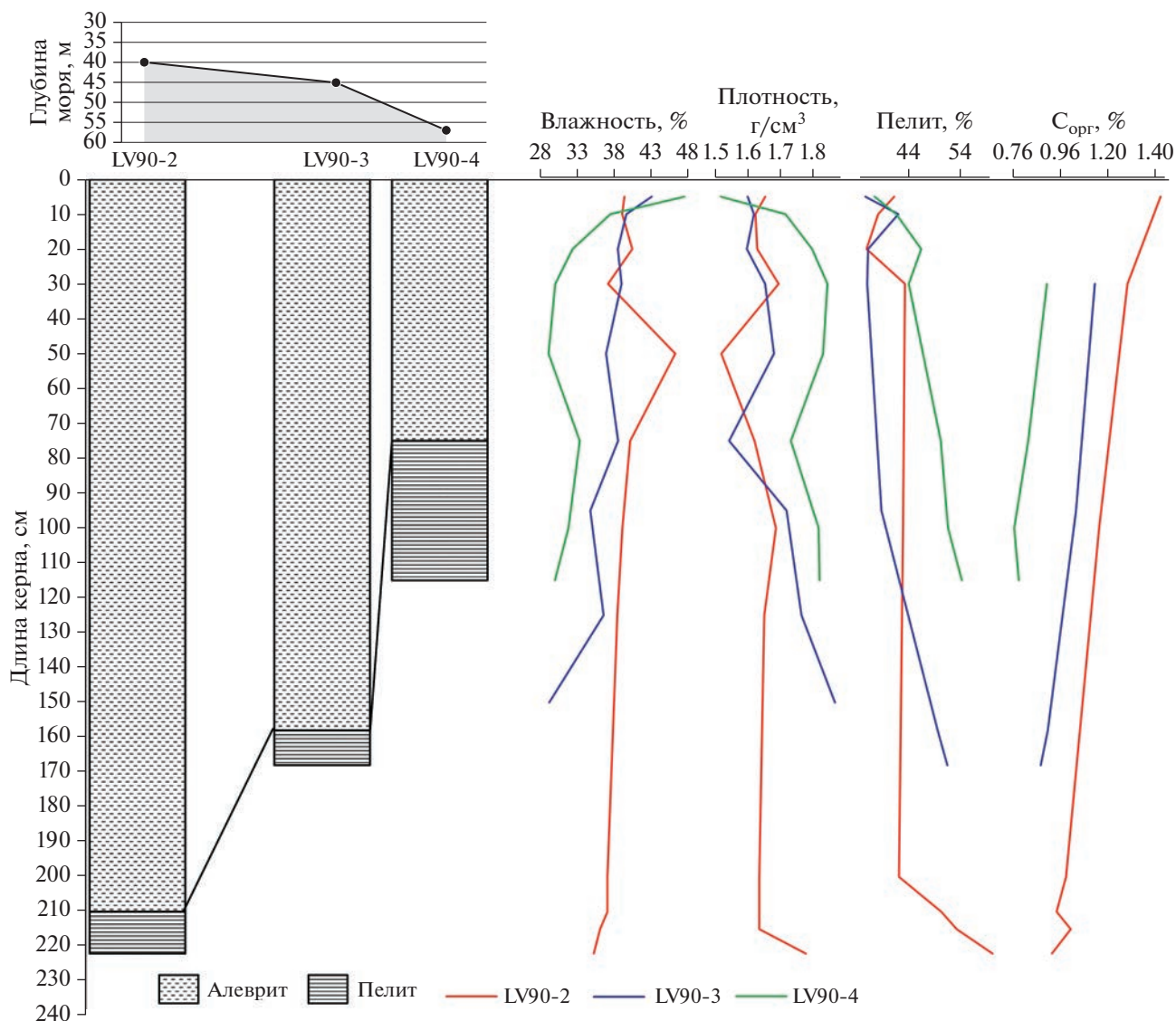


Рис. 2. Схематический литологический разрез донных отложений южной (станция LV90-2) и северной (станции LV90-3, LV90-4) частей Новосибирского бассейна (см. рис. 1) с графиками изменчивости значений естественной влажности и плотности, содержания пелитовой фракции и органической насыщенности ($C_{\text{орг}}$) осадков с увеличением глубины моря и их опробования.

увеличением содержания псаммитовой фракции и глубины опробования осадков (см. рис. 2, табл. 2).

Значения естественной и сухой плотности осадков Новосибирского бассейна варьируют в пределах 1.62–1.99 г/см³ и 0.98–1.52 г/см³, Приморского – 1.87–2.02 г/см³ и 1.30–1.54 г/см³, поднятий – 1.58–1.92 и 0.91–1.67, террасы – 1.60–1.98 г/см³ и 1.00–1.52 г/см³. Максимальными средними значениями естественной плотности характеризуются алевроит-пелит-псаммитовые осадки Приморского бассейна, поднятий и террасы с содержанием песков 10–34%, минимальными – алевроитовые осадки Новосибирского бассейна и Благовещенской террасы верхней ча-

сти опробования, промежуточными – алевроит-пелитовые осадки Новосибирского бассейна, террасы и поднятий средней части разреза (см. табл. 2).

Разница значений естественной и сухой плотности, умноженная на переводный процентный коэффициент 100, отражает показатель “пустотности” осадков или их общей пористости. С вычитом 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 бассей-

на 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 м (см. табл. 2). Следует отметить, что песчанистые осадки в целом характеризуются межгранулярной пористостью. В алевритовых осадках доминируют макропоры, в пелитовых – микропоры^{3, 4}. Данная изменчивость предопределяет различный характер *скорости газотдачи* осадков в процессе их дегазации. Минимальными объемами газа и временем дегазации характеризуются голоценовые алеврит-пелит-псаммитовые осадки южной части района исследований, максимальными – твердые позднеплейстоценовые пелитовые осадки нижних горизонтов опробования северной части с показателями естественной плотности более 1.8 г/см³ (см. рис. 2).

Содержание $C_{орг}$ в осадках изменяется от 0.64 до 2.02%. Максимальными значениями $C_{орг}$ 1.5–2.0% характеризуются осадки Медвежинского поднятия, южного крыла Благовещенской террасы и прибрежной части района исследований, минимальными – 0.6–0.8% – северной части Новосибирского бассейна, промежуточными – остальной площади. Содержание $C_{карб}$ в осадках Приморского и Новосибирского бассейнов варьирует в пределах 0.05–0.16 и 0.01–0.16% (в среднем 0.09 и 0.07%), Барановского и Медвежинского поднятий – 0.02–0.16% (0.06%), Благовещенской террасы – 0.01–0.11% (0.04%).

Газогеохимические исследования

В составе УВГ осадков района исследований установлены: метан с содержанием 0.0004–2.3540%, этан и этилен (суммарно) – 0.000001–0.0120%, пропан и пропилен – 0–0.0030, n-бутан и i-бутан – 0–0.0010, n-пентан и i-пентан – 0–0.00014%. Суммарное содержание гомологов метана изменяется от 0.000002 до 0.0170%, углекислого газа – от 0.2 до 11.7%.

Для определения генезиса УВГ использовался комплекс количественных геохимических показателей: молекулярной массы УВ-фракции ($M_{УВ}$), весовых концентраций индивидуальных УВГ, нормированных по отношению к $M_{УВ}$ УВ-фракции [Велев, 1981] и их отношений – коэффициентов преобразованности УВ-фракции ($K_{пр}$) [Нестеров, 1969], “влажности” ($K_{вл}$) [Abrams, 2005] и “сухости” ($K_{сух}$) [Высоцкий, 1979]. Коэффициенты $K_{пр}$, $K_{вл}$ и $K_{сух}$ представлены отношениями: $(C_2 \times C_4)/C_3$, $\Sigma C_2-C_5/\Sigma C_1-C_5 \times 100\%$ и $C_1/\Sigma C_2-C_5$, где C_1-C_5 – весовые концентрации индивидуальных углеводородов в долях на 1000 (грамм на килограмм газа УВ-фракции). Дополнительным газогенетическим критерием явля-

лись показатели изотопного состава углерода $\delta^{13}C-CH_4$, C_2H_6 и CO_2 [Гресов и др., 2016, 2017, 2020; Гресов, Яцук, 2020, 2021].

Установлено, что все изученные ранее литотипы и газоматеринские источники континентального и островного обрамления ВСМ, а также Чаунской, Чаун-Чукотской угленосных площадей и Ленского углефтегазоносного бассейна характеризуются индивидуальными геохимическими показателями [Гресов, 2011, 2012; Гресов, Яцук, 2021].

Интерпретация установленных значений газогеохимических показателей донных осадков района исследований с учетом данных в вышеуказанных работах позволила выделить одиннадцать генетических групп УВГ различных газоматеринских источников (табл. 3).

Анализ полученных данных подтверждает биохимическую природу УВГ первой группы – современных осадков, и ее доминирование в газах второй группы – газогидратов, формирование которых, по-видимому, связано с подстилающими их газовыми залежами. Установлено, что в миграционных УВГ кайнозойских газовых залежей доминирует биохомогенная составляющая, в мезозойских – метаморфогенная. Данная особенность характерна и для УВГ кайнозойских и мезозойских угленосных формаций. Миграционные газы твердых битумов, УВГ газоконденсатного, газонефтяного и нефтяного ряда относятся к метаморфогенным, магматическим образований – к магматогенным.

Доминирование миграционных (эпигенетических) метаморфогенных газов в донных отложениях основной площади района исследований подтверждается ростом концентраций CO_2 и УВГ с увеличением глубины опробования осадков (см. табл. 2) и данными изотопного состава углерода CH_4 и CO_2 (см. табл. 3). Установленные средние значения $\delta^{13}C-C_2H_6$ газогидратных залежей(?) – -28.7% , угленосных формаций и твердых битумов – $(-27.7$ и $-25.1\%)$, а также предполагаемых нефтегазовых и нефтяных залежей – $(-21.8$ и $-19.6\%)$, дополнительно подтверждают вышеуказанные выводы.

Газонасыщенность донных отложений по метану и его гомологам изменяется в пределах 0.0012–5.9340 и 0.00003–0.0312 см³/кг с максимумом их распределения в осадках нижнего горизонта опробования бассейнов, поднятий, террасы, и минимумом – верхнего. Аналогичное положение установлено и для CO_2 (см. табл. 2).

Обработка всего массива полученных данных позволила отнести к категории **аномалий** углекислого газа, метана и его гомологов значения их концентраций в донных осадках более 3.0, 0.05 и

Таблица 3. Средние значения геохимических показателей УВГ и CO₂ донных отложений района исследований

Генетическая группа, газоматеринский источник (донные станции)	M _{ув} , г/моль	Геохимические коэффициенты			δ ¹³ C, ‰	
		Кпр	Квл, %	Ксух	CH ₄	CO ₂
1. Современные осадки (32, 33, 34, 35, 44)	16.06	0.4	0.4	835	–79.6	–51.6
2. Газогидраты? (LV77-36, 42, LV90-2)	16.10	2.3	0.5	195	–61.8	–28.7
3. Угленосные формации (28, 31, 37, 44, 49, 51, LV77-19, LV83-3, LV90-26)	16.26	8.1	2.6	41	–58.9	–24.4
4. Газовые скопления и залежи (29, 36, LV77-18, LV90-2)	16.32	27.6	3.2	45	–62.4	–26.6
а. кайнозойского возраста (29, 36)	16.15	2.1	2.1	82	–65.2	–27.6
б. мезозойского возраста (LV77-18, LV90-2)	16.41	40.3	3.8	26	–59.7	–25.7
5. Магматические образования? (LV83-2, 39)	16.74	15.6	8.2	24	н.о.	н.о.
6. Твердые битумы (42, 50, LV77-23, LV83-35, 36, 38)	17.59	49.1	15.4	5.6	–50.7	–21.2
7. Газоконденсатные скопления и залежи* (45, LV77-21, 22, LV90-4, 27)	17.14	39.0	11.9	8.5	–54.9	–22.3
8. Конденсатные скопления и залежи* (30, 39, LV90-3)	18.50	72.3	23.2	3.4	н. о	н. о
9. Нефтегазовые скопления и залежи* (38, 43, LV77-20, 34, 40, 41, 43, LV83-37)	19.27	104.5	28.3	2.5	–43.2	–20.2
10. Газонефтяные скопления и залежи* (40, 41, LV77-35)	20.60	193.8	37.1	1.7	–39.8	–19.9
11. Нефтяные скопления и залежи* (LV77-33)	22.61	235.7	50.8	1.0	–40.2	–19.6

Примечание. * — предполагаемые скопления и залежи, н. о. — не определялся.

0.001 см³/кг [Яшин, Ким, 2007; Гресов и др., 2017, 2020].

Формирование наиболее крупных площадных аномальных газогеохимических полей метана в пелитовых и алевроитопелитовых осадках района исследований связано с процессами его интенсивной миграции из подстилающих газонасыщенных отложений на юго-западном (до 5.93 см³/кг, станция LV-42) и юго-восточном (до 2.10 см³/кг, LV-19) крыльях Новосибирского бассейна (рис. 3а) в зонах распределения газогидратных(?) газовых залежей и угленосных формаций (см. табл. 3, табл. 4), осложненных системами позднемеловой тектонической нарушенности, сопровождающейся в ряде случаев образованием газовых “факелов” [Thornton et al., 2020] в пределах Главного структурного шва (Новосибирского разлома).

Образование аномалий CH₄ в алевроитопелитовых и алевроит-пелит-псаммитовых осадках Приморского бассейна (до 0.23 см³/кг, LV-40) и южной части Благовещенской террасы (до 0.35 см³/кг, станция 49) связаны с процессами его миграции из угленосных формаций и предполагаемых газоконденсатных и нефтегазовых залежей (см. табл. 3, 4) в пределах зоны Анюйского разлома.

Формирование аномальных концентраций метана до 0.58 см³/кг (станция 35) в алевроит-пелит-псаммитовых осадках южной части Медвежинского поднятия связано с процессами современного седиментогенеза и преобразования ОВ

(δ¹³C–CH₄ = –82.7...–79.6) в палеорусле р. Колымы, в алевроитопелитовых осадках северной части поднятия (до 0.14 см³/кг, станция 37) — с процессами его миграции из кайнозойских угленосных формаций и газовых залежей.

Важно отметить, что большинство аномалий метана в донных отложениях Новосибирского, Приморского бассейнов и Благовещенской террасы установлены в пределах палеодолин рек Индигирки (станции LV-36, LV-40, LV-42), Хромы (станция 45), Колымы и ее притока (станции 29, 35, 36, 38), где установлена высокая мощность четвертичных отложений. Не менее важен факт отсутствия аномалий CH₄ на исследованной площади развития каледонской складчатости в северной части района работ (см. рис. 3а).

В результате исследований выделено четыре основных аномальных газогеохимических поля гомологов метана в осадках района работ (см. рис. 3б). Формирование первого поля с суммарными концентрациями гомологов метана до 0.0312 см³/кг (станция LV-19) установлено в алевроитопелитовых осадках юго-восточного крыла Новосибирского бассейна в пределах развития газоносных мезозойских каменноугольных формаций, второго — до 0.0309 см³/кг (LV-40) — Приморского бассейна и Благовещенской террасы (до 0.0259 см³/кг, станция 45) на площадях распространения предполагаемых нефтегазовых залежей, а также залежей и скоплений твердых би-

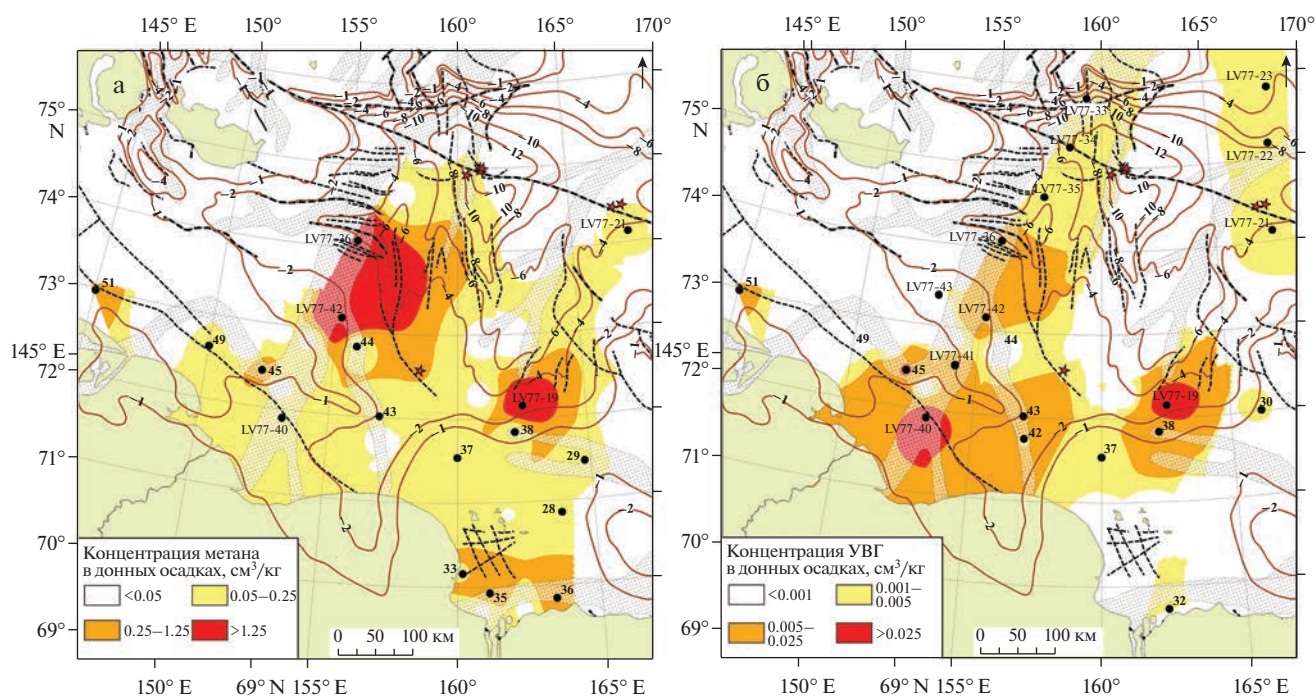


Рис. 3. Распределение аномальных газогеохимических полей метана (а) и его гомологов (б) в донных осадках района исследований.

Условные обозначения см. рис. 1.

тумов и газоконденсата (см. табл. 3, 4) в зоне Анюйского разлома и палеодолин рек Индигирки и Алазеи.

Образование третьего аномального поля связано с процессами интенсивной миграции УВГ из подстилающих газонасыщенных отложений в алевроитопелитовые и пелитовые донные осадки юго-западного и северного крыла Новосибирского бассейна (до $0.0134 \text{ см}^3/\text{кг}$, станция LV-42 и до $0.004 \text{ см}^3/\text{кг}$, LV-33) в зонах развития предполагаемых угленосных формаций, газогидратных, газовых, нефтегазовых, газонефтяных и нефтяных залежей в пределах распространения систем поздне меловой тектонической нарушенности, сопровождающейся в ряде случаев образованием газовых “факелов” (см. рис. 3б).

Формирование четвертого поля аномальных суммарных концентраций гомологов метана в пелитовых осадках на северо-восточном крыле Новосибирского бассейна до $0.002 \text{ см}^3/\text{кг}$ (станции LV-21, LV-22, LV-23) обусловлено процессами их природной диффузии и миграции в зоне Главного структурного шва (Новосибирского разлома) из предполагаемых залежей твердых битумов и газоконденсата.

В процессе исследований установлены три аномальных локальных зоны УВГ в пределах Котельнического поднятия (до $0.0065 \text{ см}^3/\text{кг}$, станция 51), Барановского поднятия (до 0.0016 , станция 30) и

Медвежинского поднятия (до $0.0047 \text{ см}^3/\text{кг}$, представленные в основном этаном и этиленом, станция 32) на площадях распространения угольных залежей, а также в обогащенных ОВ современных осадках в зонах тектонической нарушенности (см. рис. 3б).

Следует отметить, что аномальные суммарные концентрации гомологов CH_4 в осадках наблюдаются в пределах среднего и нижнего горизонта их опробования (см. табл. 2), и в зонах максимальной мощности четвертичных отложений палеодолин рек района исследований.

Установленные средние значения концентраций CO_2 более $3 \text{ см}^3/\text{кг}$ в донных отложениях осадочных бассейнов, поднятий и террасы (см. табл. 2) указывают на аномальный характер его распределения на основной площади района исследований.

Исходя из вышеизложенного, основными геологическими факторами формирования аномалий углекислого газа, метана и его гомологов в донных отложениях западной части ВСМ являются: газонасыщенность подстилающих отложений и разновидность газоматеринского источника, разрывная и пликвативная тектоника, геоструктурное положение и мощность четвертичных отложений, органическая насыщенность осадков и подстилающих отложений, углефтегазоносность и возраст складчатого основания.

Таблица 4. Средние литолого-газгеохимические показатели на участках развития УВГ различных газоматеринских источников и аномальных газгеохимических полей

Газоматеринский источник	Концентрация газов, см ³ /кг		Wo, %	Гранулометрический состав, %			Do, г/см ³	C _{орг} , %
	CH ₄	ΣC ₂ –C ₅		Pl	A	Ps		
Современные осадки*	0.1458	0.0001	30.6	26.6	47.1	24.8	1.99	1.62
Газогидраты?	2.9861	0.0064	35.8	52.4	47.4	0.2	1.76	1.12
Угленосные формации	0.4357	0.0061	25.6	40.6	57.8	0.6	1.84	1.19
Газовые скопления и залежи	0.1542	0.0004	26.5	42.5	55.9	1.6	1.83	1.40
Магматические образования	0.0068	0.0003	33.0	44.8	55.2	0	1.74	1.37
Твердые битумы	0.0119	0.0012	31.6	50.4	49.6	0.03	1.76	1.08
Конденсатно-газовые скопления и залежи	0.0744	0.0052	32.0	52.3	46.7	1.0	1.83	0.92
Конденсатные скопления и залежи	0.0065	0.0009	32.5	43.4	56.0	0.6	1.75	1.03
Нефтегазовые скопления и залежи	0.0592	0.0085	27.4	41.0	56.5	2.5	1.83	0.91
Газонефтяные скопления и залежи	0.0073	0.0016	29.2	45.4	53.6	0.8	1.80	0.88
Нефтяные скопления и залежи	0.0080	0.0036	27.6	58.5	41.5	0.01	1.90	0.92

Примечание. * — номера донных станций и условные обозначения см. табл. 2, 3.

Корреляционные исследования

В процессе корреляционных исследований установлено, что содержание пелитовой фракции связано прямой связью ($r = 0.80$) с глубинами моря, естественной плотностью (0.58), влажности осадков (0.32) и обратной — с показателями алевритовой и псаммитовой фракций (–0.99 и –0.85). Содержание алевритовой фракции связано прямой связью с показателями псаммитовой фракции (0.89) и обратной — с глубинами моря (–0.82) и естественной плотностью осадков (–0.57). Содержание псаммитовой фракции связано обратными корреляционными связями с показателями естественной плотности (–0.61), глубиной моря и глубинами опробования осадков (–0.58 и –0.36).

Показатели влажности осадков характеризуются прямой связью с глубинами моря (0.52) и обратными — с показателями открытой пористости (–0.88), глубинами опробования осадков и содержанием C_{орг} (–0.92); естественной плотности — со значениями сухой плотности (0.91), содержанием пелитовой фракции и глубинами моря — (0.58 и 0.46), обратной связью — с содержанием псаммитовой и алевритовой фракции (–0.61 и –0.49). Показатели открытой пористости связаны высокой степенью связи с глубинами

опробования осадков (0.93), содержанием C_{орг} (0.91) и слабой обратной — с содержанием псаммитовой фракции (–0.29).

Концентрации метана в донных отложениях связаны прямыми корреляционными связями с содержанием C_{орг} ($r = 0.97$), глубиной опробования осадков и показателями их открытой пористости (0.84 и 0.91), концентрациями его гомологов и CO₂ (0.96 и 0.75), коэффициентом “сухости” (0.86) и слабой связью с содержанием алевритовой фракции (0.29); а также высокой обратной связью со значениями влажности осадков (–0.90), показателями M_{ув} (–0.71), K_{пр} и K_{вл} (–0.73 и –0.75) и слабой — с содержанием пелитовой фракции и глубиной моря (–0.26 и –0.24). Корреляционные связи концентраций CH₄ с показателями псаммитовой фракции и плотности осадков характеризуются практически нулевыми значениями.

Суммарные концентрации гомологов метана характеризуются высокой прямой связью с содержанием C_{орг} (0.97), концентрациями CH₄ и CO₂ (0.96 и 0.84), показателями открытой пористости осадков и глубинами их опробования (0.81 и 0.85), слабой связью с содержанием алевритовой фракции (0.24), естественной плотности (0.23), а также обратной связью с влажностью

осадков (-0.82). показателями $M_{ув}$, $K_{пр}$ и $K_{вл}$ (-0.71 , -0.73 и -0.75) и слабой — с содержанием пелитовой фракции (-0.23). Корреляционная связь концентраций гомологов метана с содержанием псаммитовой фракции характеризуется нулевыми значениями.

Концентрации углекислого газа в донных осадках связаны прямыми корреляционными связями с содержанием $C_{орг}$ ($r = 0.86$), глубиной опробования осадков и показателями их открытой пористости (0.87 и 0.75), концентрациями CH_4 его гомологов (0.75 и 0.84), коэффициентом “сухости” (0.65) и естественной плотности (0.45), а также обратной связью со значениями влажности осадков (-0.79), глубинами моря (-0.27) и содержанием псаммитовой фракции (-0.21). Корреляционные связи концентраций CO_2 с показателями пелитовой и алевроитовой фракций в осадках характеризуются практически нулевыми значениями.

Таким образом, формирование газовых аномалий в районе исследований обусловлено в значительной мере органической насыщенностью, открытой пористостью и влажностью осадков, в меньшей — естественной плотностью, и в незначительной — литологическим составом донных отложений.

ОБСУЖДЕНИЕ

Акватория района исследований является частью мелководного Восточно-Сибирского моря, расположенного в области полярного седиментогенеза, главными особенностями которого являются преобладание физического выветривания в областях питания и стабилизации осадочного материала, весьма замедленный темп химических процессов в водной среде и терригенный генезис донных осадков [Государственная ..., 20066].

В процессе исследований установлено, что значительная часть терригенных частиц первоначально оседает в заливах или вблизи берегов, где по мере возрастания глубин моря формируются осадки алевроит-псаммит-пелитового и алевроит-пелит-псаммитового состава. Дальнейшее увеличение глубин моря и наличие ледового покрова уменьшает волновое воздействие на дно, и создаются благоприятные условия для оседания тонкозернистого материала и формирования осадков пелит-алевритового и пелитового состава, иногда с примесью песков ($A - 36-65\%$, $P_1 - 37-64$ и $P_s - 0-7\%$) [Геология ..., 2003, 2004]. Наличие песчаных осадков с содержанием $9-10\%$ в интервале опробования $1.5-2.5$ м (см. табл. 2), по-видимому, связано с процессами трансгрессии моря в период формирования донных отложений этого интервала. На побережье ВСМ фиксируют-

ся средне-позднеплейстоценовая и голоценовая трансгрессии моря и разделяющие их регрессии [Дегтяренко и др., 1982]. В регрессивные этапы, когда береговая линия располагалась ближе к бровке шельфа, возрастал объем осадочного материала, вовлеченного в мутьевые потоки, увеличивалась и их эродирующая способность. Важно отметить, что при существующем объеме геологических данных не удастся уверенно выявить соотношение денудационных и аккумулятивных составляющих гравитационных процессов. В ходе их развития это соотношение менялось в зависимости от исторического положения береговой линии. Процессы устойчивой аккумуляции в условиях стабильной слабой гидродинамики локализуются в центральной и северной части Новосибирского бассейна, в том числе в наиболее глубоких участках днища палеодолины Пра-Индигирки. Скорости накопления осадков в этой части бассейна значительно увеличиваются. Исходя из данных [Astakhov et al., 2019], скорости накопления голоценовых осадков по разрезу изменяются от 12 см/1000 лет в верхней его части до 42 см/1000 лет — в нижней. В северо-восточной части бассейна по данным [Stein et al., 2017] аналогичные показатели изменяются от 12 до 20 см/1000 лет. Скорость накопления плейстоценовых осадков северной части Новосибирского бассейна [Гусев и др., 2013] не превышает 3 см/1000 лет и возрастает в направлении бровки шельфа от 16 до 20 см/1000 лет [O'Regan et al., 2017].

По данным [Гусев и др., 2021] и датировок возраста осадков в западной части ВСМ, выделяется верхняя сейсмостратиграфическая толща ССТ-I, которая соотносится с голоценом и четвертой ступенью позднего неоплейстоцена и соответствует морским изотопным стадиям МИС-1 и МИС-2. Ниже выделяется ССТ-II, соответствующая третьей ступени позднего неоплейстоцена и МИС-3. Последняя сейсмическая толща ССТ-III относится ко второй ступени позднего неоплейстоцена III_2 и коррелируется с МИС-4.

Установлено, что влажность осадков возрастает с увеличением глубины моря, а возрастание значений $C_{карб}$ и плотности осадков, как правило, сопровождается уменьшением их влажности. Плотность осадков увеличивается с содержанием псаммитовой фракции и уменьшается с глубиной моря и показателями их открытой пористости. Распределение $C_{орг}$ и $C_{карб}$ характеризуется тенденцией уменьшения их содержаний в осадках в мористом направлении, а также с возрастанием глубины их опробования. Данный факт соответствует общей геохимической закономерности распределения углерода в осадках, характерной для акваторий Арктического региона [Данюшевская и др., 1990; Романкевич, Ветров, 2001; Bröder et al., 2019].

Исходя из установленных значений $M_{УВ}$, Квл, $\delta^{13}C-CH_4$, C_2H_6 и CO_2 , в изученных голоцен-плейстоценовых отложениях западной части ВСМ доминируют *эпигенетические* УВГ, поступающие в осадки в процессе природной диффузии и миграции по зонам тектонических нарушений из подстилающих газоматеринских источников. Аналогичное положение наблюдается в донных отложениях центральной и восточной части ВСМ [Шакиров и др., 2013; Гресов, Яцук, 2020, 2021]. При этом, УВГ современных осадков прибрежной части Благовещенской террасы и Медвежинского поднятия характеризуются *сингенетическим* характером образования [Яшин, Ким, 2007], что подтверждается значениями их газогеохимических показателей (см. табл. 3). Данное положение характерно и для газов подстилающих донные осадки торфяников [Гресов, Яцук, 2020, 2021]. УВГ лигнитов, бурых углей и газогидратов(?), представлены полигенетическим составом [Гресов, Яцук, 2021].

В донных осадках района исследований установлены одиннадцать генетических групп УВГ, представленных биогенными газами современных осадков, метаморфогенными — угленосных формаций, газовых залежей, твердых битумов, предполагаемых газогидратных, конденсатногазовых, газоконденсатных, нефтегазовых, газонефтяных и нефтяных залежей, а также магматогенных — магматических образований. Газогеохимические показатели установленных групп достаточно близки или соответствуют их аналогам Анадырского, Ленского, Камчатского, Охотоморского и Сахалинского углефтегазоносных бассейнов Востока и Северо-Востока России [Алексеев и др., 1981; Гресов, 2011, 2012].

Установлено, что формирование состава и концентраций газов в осадках района исследований подчиняется правилам аддитивности, т.е. последовательного накопления газов различного генезиса с преобладанием газовой фазы и газогеохимических показателей более газонасыщенного газоматеринского источника [Велев, 1981], что повсеместно наблюдается во всех геоструктурах ВСМ и прилегающего сектора Северного Ледовитого океана [Гресов и др., 2020, 2021; Гресов, Яцук, 2020, 2021].

Установленные аномальные газогеохимические поля в осадках западной части ВСМ с концентрациями метана и его гомологов до $5.934 \text{ см}^3/\text{кг}$ и $0.0312 \text{ см}^3/\text{кг}$, зафиксированы и в его восточной части (до 12.15 и 0.02) [Шакиров и др., 2013; Гресов и др., 2017], а также в море Лаптевых (до 2.29 и 0.169) и Чукотском (до $57.0 \text{ см}^3/\text{кг}$ и $0.02 \text{ см}^3/\text{кг}$) [Геология ..., 2003, 2004; Яшин, Ким, 2007].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование УВ-аномалий в донных осадках района исследований связаны главным образом с высокими значениями открытой пористости, содержаниями $C_{орг}$ и глубинами опробования, в незначительной мере — с литологическим составом и плотностными показателями. На площадях с высокими содержаниями влажности осадков аномалии УВГ практически отсутствуют.

Основными геологическими факторами формирования углеводородных аномалий в донных отложениях являются: газоносность подстилающих отложений и разновидность газоматеринского источника, разрывная и пликтивная тектоника, геоструктурное положение и мощность четвертичных отложений, органическая насыщенность осадков и подстилающих отложений, углефтегазоносность и возраст складчатого основания.

Результаты настоящих газогеохимических исследований подтверждают, что показатели молекулярной массы и газогенетических коэффициентов являются достаточно характерными индикаторами разнотипных УВГ донных осадков. Применение данных показателей в комплексе с изотопными исследованиями позволяет не только выделять основные газоматеринские источники в теоретическом плане, но и использовать в прикладном отношении — при прямых поисках нефти и газа, и других источников углеводородного сырья.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.С. Астахову, Р.Б. Шакирову, А.А. Босину и Ю.П. Василенко за поддержку в проведении экспедиционных морских исследований, В.В. Калинин и Д.А. Швалову за помощь в отборе проб донных осадков, а также А.В. Алаторцеву за подготовку проб для проведения аналитических работ.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Газогеохимические и аналитические исследования выполнены в рамках Гостемы ТОИ ДВО РАН № 0211-2021-0006 “Газогеохимические поля Мирового океана, геодинамические процессы и потоки природных газов, влияющие на формирование геологических структур с залежами углеводородов и аутигенной минерализации” (№ 121021500055-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев А.Ф., Бодунов Е.И., Лебедев В.С., Захарова С.С., Томская Е.С., Безменова П.Н., Трущелева Г.С., Лебедев Вал.С. Изотопно-геохимическая характеристика нефтей и газов восточной части Сибирской платформы // Органическая геохимия нефтей, газов и

органического вещества докембрия / Под ред. А.А. Алексеева. М.: Наука, 1981. С. 164–175.

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 / Под ред. А.А. Алексеева. М.: Наука, 1981. С. 22–28.

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. Погребницкого. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. 468 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000. Лист S 53–55 (Новосибирские острова). Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. 208 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000. Лист S 53–55 (Новосибирские острова). Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2006а. 208 с.

Государственная геологическая карта России. Масштаб 1 : 1 000 000. Лист 57–58 (Восточно-Сибирское море). Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2006б. 51 с.

Государственная геологическая карта России. Масштаб 1 : 1 000 000. Лист 59–60 (Восточно-Сибирское море). Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2006в. 47 с.

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

Гресов А.И. Геохимическая классификация углеводородных газов углеводородногазовых бассейнов Востока России // Тихоокеанская геология. 2011. № 2. С. 87–103.

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., 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. № 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.

Гресов А.И., Сергиенко В.И., Яцук А.В., Зарубина Н.В., Калинин В.В. Газогеохимические показатели донных отложений северной части Восточно-Сибирского моря и котловины Подводников Северно-Ледовитого океана // ДАН. 2020. № 1. С. 113–117.

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. № 2. С. 197–215.

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.

Гусев Е.А., Рекант П.В., Большиханов 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.

Гусев Е.А., Крылов А.А., Маев П.А., Понимаскин А.И., Озеров И.С., Пронин И.С., Бирюков Е.А., Рыбницкий Е.Е., Задорожный Т.Н., Покровская С.О. Результаты сейсмоакустического профилирования в западной части Восточно-Сибирского моря // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. Вып. 8. С. 58–61.

Данюшевская А.И., Петрова В.И., Яшин Д.С., Батова Г.И., Артемьев В.Е. Органическое вещество донных осадков полярных зон Мирового океана. Л.: Недра, 1990. 280 с.

Дегтяренко Ю.П., Пуминов А.П., Благовещенский М.Г. Береговые линии восточно-арктических морей в позднем плейстоцене и голоцене. Колебания уровня морей и океанов за 15 000 лет. М.: Наука, 1982. С. 179–185.

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

Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.

Руководство по определению и прогнозу газоносности вмещающих пород при геологоразведочных работах. Ростов-на-Дону: ВНИИГРИУголь, 1985. 96 с.

Рябчук Д.В., Прищепенко Д.В., Ковалева О.А., Жамойда В.А., Григорьев А.Г., Сергеев А.Ю., Буданов Л.М., Нестерова Е.Н., Дронь О.В. Литология поверхностных отложений Восточно-Сибирского моря по результатам геологического картирования акваториальной части листов R-56–60 // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2020. Вып. 7. С. 188–197.

Соколов С.Ю., Чамов Н.П., Курносое В.Б. Структура и состав голоцен-плейстоценовых осадков северной части Баренцева моря // Литология и полез. ископаемые. 2020. № 6. С. 487–500.

Старобинец И.С., Петухов А.В., Зубайраев С.Л. и др. Основы теории геохимических полей углеводородных скоплений. М.: Недра, 1993. 332 с.

Ступакова А.В., Суслова А.А., Большакова М.А., Сауткин Р.С., Санникова И.А. Бассейновый анализ для поиска крупных и уникальных месторождений в Арктике // Георесурсы. Специальный выпуск. 2017. Часть 1. С. 19–35.

Флюидогеодинамика и нефтегазоносность северо-восточной окраины Азии. Карта масштаба 1 : 2 500 000. Объяснительная записка / Гл. ред. Ю.А. Косыгин. Хабаровск: ИТиГ, ГУГК, 1989. 96 с.

- Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И. Газо-геохимические аномалии в осадках Восточно-Сибирского моря // Вестник КРАУНЦ. 2013. № 1. С. 98–110.
- 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. P. 457–477.
- Abrams M.A. Evaluation of Near-Surface Gases in Marine Sediments to Assess Subsurface Petroleum Gas Generation and Entrapment // Geosciences. 2017. V. 7. P. 29–35.
- Astakhov A.S., Sattarova V.V., Shi Xuefa, Hu Limin, Ak-sentov K.I., Alatorsev 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.
- Bröder L., Andersson A., Tesi T., Semiletov I., Gustafsson Ö. Quantifying degradative loss of terrigenous organic carbon in surface sediments across the Laptev and East Siberian Sea // Global Biogeochemical Cycles. 2019. V. 33. P. 85–99.
- O'Regan M., Backman J., Barrientos N., Cronin T.M., Gemery L., Kirchner N., Mayer L.A., Nilsson J., Noormets R., Pearce C., Semiletov I., Stranne C., Jakobsson M. The De Long Trough: a newly discovered glacial trough on the East Siberian continental margin // Clim. Past. 2017. V. 13. P. 1269–1284.
- Jakobsson M., Mayer L., Coakley B., Dowdeswell J.A., Forbes S., Fridman B., Hodnesdal H., Noormets R., Pedersen R., Rebesco 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., Moham-mad 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.
- Stein R., Fahl K., Schade I., Manerung A., Wassmuth S., Niessen F., Nam S.-H. Holocene variability in sea ice cover, primary production, and Pacific-Water inflow and climate change in the Chukchi and East Siberian Seas (Arctic Ocean) // J. Quaternary Sci. 2017. V. 32(3). P. 362–379.
- 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.
- Velivetskaya T.A., Ignatev A., Kiyashko S. Universal method for preparation of liquid, solid and gaseous samples for determining the isotopic composition of carbon / Ed. V.S. Sevastyanov // Isotope Ratio Mass Spectrometry of Light Gas-Forming Elements. UK: CRC Press, 2015. P. 119–134.

Lithological Composition and Hydrocarbon Anomalies of Bottom Sediments of the Western Part of the East Siberian Sea

A. I. Gresov^{1, *}, A. V. Yatsuk^{1, **}, K. I. Aksentov¹

¹*Il'ichev Pacific Institute of Oceanology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Baltiyskaya str., 43, Vladivostok, 690041 Russia*

**e-mail: gresov@poi.dvo.ru*

***e-mail: yatsuk@poi.dvo.ru*

On the basis of lithological and gas geochemical studies and a comprehensive interpretation of the available materials, the main factors of the formation and distribution of grain size distribution, water-physical properties, organic saturation, concentrations and geochemical parameters of hydrocarbon gases in seafloor sediments of geostructures of the western part of the East Siberian Sea are summarized and analyzed. It has been established that the sediments of the northern and central parts of the study area are represented by aleurite-pelites, the southern – by aleurite-pelite-psamites with variations in C_{org} values – 0.6–2.0%, natural humidity and density – 18–43% and 1.5–2.0 g/cm³, open porosity – 17–33%, the concentrations of methane and its homologues are 0.001–5.934 and 0.00003–0.0312 cm³/kg, the molecular mass of the hydrocarbons fraction, the “wetness”, “dryness” coefficients, and the coefficients of the transformation are 16.05–22.6 g/mol, 0.2–51%, 1–1999, 0.2–50.8 and $\delta^{13}C-CH_4$ (–82.7...–38.4‰). Based on the values of gas geochemical parameters, eleven types of gas sources were identified in bottom sediments. In the process of research, it was found that the formation of hydrocarbon anomalies in sediments is mainly associated with their reservoir properties, C_{org} content and depths of their sampling, as well as with the complex influence of geological factors, the main of which are the gas saturation of the underlying sediments and the type of gas sources, discontinuous and plicative tectonics, geostructures position, thickness of Quaternary deposits, coal and gas content and age of the folded base. To a lesser extent, anomalies of hydrocarbon gases are associated with the lithological composition and density parameters of sediments.

Keywords: seafloor sediments, lithological and gas geochemical studies, hydrocarbon gases, East Arctic shelf.