

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОКРАИННО-ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЫ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ И СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

© 2022 г. А. И. Гресов^а, *, А. В. Яцук^а, **, К. И. Аксентов^а, В. В. Саттарова^а,
Д. А. Швалов^а, Н. В. Зарубина^б

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

^бДальневосточный геологический институт ДВО РАН,
проспект 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, 690022 Россия

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

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

Поступила в редакцию 08.12.2021 г.

После доработки 22.01.2022 г.

Принята к публикации 27.01.2022 г.

Представлены данные геохимических исследований плейстоценовых отложений центральной части внешнего шельфа Восточно-Сибирского моря, континентального склона и котловины Подводников Северного Ледовитого океана. Изученные осадки внешнего шельфа и континентального склона относятся к алевритопелитовому типу осадков, бровки шельфа и котловины Подводников – пелито-алевритовому. Содержание псаммитовой фракции не превышает 10%, каменного материала – 1%. Данные особенности предопределяют распределение максимальных показателей плотности отложений и медианных диаметров в осадках внешнего шельфа, минимальных – котловины Подводников. Аналогичной изменчивостью характеризуется распределение в изученных осадках содержания $S_{орг}$ и $S_{карб}$. Средние значения влажности донных отложений района исследований закономерно возрастают в направлении “шельф–пелагиаль”. Изучение химического и газового состава донных осадков в этом же направлении позволило выделить четыре основные группы геохимических ассоциаций в плейстоценовых отложениях района исследований. Донные отложения внешнего шельфа характеризуются максимальными концентрациями первой группы химических элементов (Si, Sr, Ba) и метана (до 0.102 см³/кг), бровки шельфа – второй – (Cd, Hg, U, K, Ca) и минимальными – метана (до 0.002 см³/кг). В осадках континентального склона установлены максимальные концентрации третьей группы (Cu, Zn, Ti, Be, Nb, Ag, Tl, Pb, Lu, Tm, Tb, Ho, Eu, Yb, Er, Dy), котловины Подводников – четвертой – (Mn, Fe, Al, Cr, P, Mg, Mo, Ni, Sb, Sn, As, Th, Co, Ga, W, Hf, Rb, V, Cs, Sc, Li, Gd, Sm, Pr, Nd, La, Ce) и промежуточные – метана (до 0.051 см³/кг). Максимальными значениями суммарной концентрации гомологов метана (до C₃ включительно – 0.006 см³/кг), $\delta^{13}C-C_2H_6$ (до –36.0‰), $\delta^{13}C-C_2H_6$ (до –17.2‰), молекулярной массы (до 27.5 г/моль), коэффициентов преобразованности и “влажности” углеводородной фракции характеризуются плейстоценовые отложения континентального склона и подножья котловины Подводников, минимальными – внешнего шельфа. Установленные значения изотопно-газогеохимических показателей указывают на доминирование в изученных осадках эпигенетических углеводородных газов различных газоматеринских источников. В результате исследований установлены прямые и обратные корреляционные связи геохимических и изотопно-газогеохимических показателей. На основе полученных данных выполнена оценка нефтегазоперспективности района исследований.

Ключевые слова: плейстоценовые донные отложения, органическое вещество, химический состав, углеводородные газы, изотопно-газогеохимические показатели, нефтегазоносность, Восточно-Сибирское море, Северный Ледовитый океан

DOI: 10.31857/S001675252210003X

ВВЕДЕНИЕ

Органическое вещество (ОВ) и углеводородные газы (УВГ) донных отложений морей и океанов являются важнейшими компонентами осадочной оболочки Земли. Знание закономерностей их распределения и накопления важно не только в теоретическом плане, для понимания процессов седиментогенеза и диагенеза, но и

дочной оболочки Земли. Знание закономерностей их распределения и накопления важно не только в теоретическом плане, для понимания процессов седиментогенеза и диагенеза, но и

имеет непосредственное отношение к палеогеографическим и палеогеохимическим исследованиям, а также — к оценке минеральных ресурсов, прежде всего нефти и газа.

Оценка перспектив нефтегазоносности новых территорий базируется в настоящее время на осадочно-миграционной теории образования УВГ, в основе которой лежит ОВ, рассматриваемое в рамках этой теории в качестве материнского — для газа и нефти. Согласно существующим представлениям о наличии фильтрационно-диффузионного массопереноса УВГ из залежей в перекрывающие их отложения, газогеохимические показатели донных осадков являются прямыми признаками нефтегазоносности недр (Старобинец и др., 1993; Яшин, Ким, 2007; Abrams, 2017).

Первые сведения об органической насыщенности и составе УВГ донных осадков Восточно-Сибирского моря (ВСМ) получены сотрудниками НИИГА при проведении геохимических исследований на попутных судах ММФ СССР в период 1975–1981 гг.¹

Наиболее полные сведения по геохимии донных отложений шельфа ВСМ и Северного Ледовитого океана (СЛО) в последующие годы приведены в работах (Романкевич и др., 1982; Галимов, Кодина, 1982; Данюшевская и др., 1990; Кошелева, Яшин, 1999; Романкевич, Ветров, 2001; Геология..., 2003; Ветров и др., 2008; Yamamoto et al., 2008; Yamamoto, Polyak, 2009; Stein et al., 2009; Гусев и др., 2012, 2013; Шакиров и др., 2013; Астахов и др., 2013; O'Regan et al., 2017; Петрова и др., 2018; Astakhov et al., 2019; Севастьянов и др., 2019, 2020).

Целью исследований являлось изучение особенностей распределения ОВ, химического и газового состава плейстоценовых отложений центральной части внешнего шельфа ВСМ, континентального склона и котловины Подводников СЛО. Прикладная задача заключалась в газогеохимической оценке перспектив нефтегазоносности района исследований. Актуальность работы обусловлена не только слабой изученностью района, но и приоритетом научных исследований в Арктической зоне Российской Федерации.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Объектом исследований являлись керны донных осадков длиной 45–500 см, отобранные гидростатическими трубками в ходе проведения российско-китайских экспедиций на НИС “Академик М.А. Лаврентьев” в 2016 году (рейс LV-77, станции 23-31) и 2020 году (рейс LV-90, станции 4, 5). Всего в районе исследований выполнено 12 станций, на глубинах моря 57–2567 м. Исходя из целе-

вых задач работы, для опробования плейстоценовых осадков использовался средний и нижний горизонт кернов (табл. 1).

Изучение водно-физических свойств и гранулометрического состава осадков осуществлялось в лаборатории геохимии осадочных процессов ТОИ ДВО РАН. Определение плотности и влажности выполнено методом режущего кольца и термостатно-весовым методом, гранулометрического состава — методом лазерной дифрактометрии с использованием лазерного анализатора размера частиц Analyzette 22 NanoTec (Fritsch).

Определение химического элементного состава и ОВ, отобранных донных осадков, осуществлялось в аккредитованном Аналитическом центре (лаборатория аналитической химии) ДВГИ ДВО РАН. Общий органический и неорганический углерод определялся методом ИК-детектирования на анализаторе TOC-V (Shimadzu, Япония). Основные химические элементы (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P) определялись методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) на спектрометре iCAP 7600Duo (Thermo Scientific Corporation, США). Микроэлементы (Li, Be, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Zr, Nb, Mo, Cd, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Vi, Th, U) и РЗЭ (Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на спектрометре Agilent 7700 (Agilent Technology, США). Для оценки достоверности результатов анализов использовался стандартный образец Геологической службы США MAG-1.

Изучение состава газов и газонасыщенности донных отложений осуществлялось методом поинтервального отбора проб осадка керна в герметические сосуды с последующей их дегазацией. В процессе опробования отобрано 18 герметических сосудов и проанализировано 54 пробы газа трех стадий дегазации (свд — свободное газовыделение, тд и твд — термо и термовакуумная дегазация). Методика опробования, дегазации, расчета состава газа и газонасыщенности изученных отложений соответствовала действующему нормативному руководству (Руководство..., 1985). Хроматографический анализ газа проводился в аттестованной Росстандартом лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН на хроматографах “Хроматэк-Газохром 2000” (ЗАО СКБ Хроматэк, Россия) и “КристалЛюкс-4000М” (ООО “НПФ “Мета-хром”, Россия) по оптимизированным для выполненных исследований методикам в соответствии с (ГОСТ 31371.3-2008).

Установленные значения показателей молекулярной массы УВ-фракции ($M_{УВ}$) и коэффициента “влажности” $K_{вл}$ использовались в работе как индикаторы генетических особенностей УВГ раз-

¹ Органическое вещество и углеводородные газы донных отложений Арктических морей СССР (1981) Отчет о НИР/Яшин Д.С., Ленинград: НИИГА, 232 с.

Таблица 1. Характеристика донных станций и методы исследований керна осадков

Район исследований	Номер станции	Глубина моря, м	Рейс	Длина керна, м	Интервалы опробования керна, м	Методы исследований*	
Внешний шельф	4	57	LV90	1.37	0.40–0.50	ЛД, РК, ТВ, ТОС, ICP-MS, ICP-AES, ДГ, ГХ	
					0.80–0.90		
					1.17–1.27		
Бровка шельфа	31	90	LV77	1.18	0.90–1.10	», IRMS	
	32	67	LV77	1.65	1.40–1.60	», IRMS	
	5	104	LV90	3.20	0.60–0.75	ЛД, РК, ТВ, ТОС, ICP-MS, ICP-AES, ДГ, ГХ	
					0.90–1.10		
					1.80–2.00		
Континентальный склон	23	140	LV77	1.20	2.10–2.20	», IRMS	
	30	132	LV77	0.45	2.90–3.10		
	24	248	LV77	1.20	0.95–1.10	», IRMS	
	25	296	LV77	2.50	0.35–0.45	»	
	29	370	LV77	3.20	1.00–1.15	»	
	Верхняя терраса, котловина	26	1494	LV77	4.12	2.25–2.45	»
		27	2565	LV77	4.10	3.00–3.20	»
28		1365	LV77	5.00	3.90–4.10	»	
					4.45–4.75	»	

Примечания. Методы исследований*: ЛД – лазерной дифрактометрии. РК – режущего кольца. ТВ – термостатно-весовой, ТОС – ИК-детектирования, ICP-MS – атомно-эмиссионной спектрометрии, ICP-MS – масс-спектрометрии. ДГ – дегазационный. ГХ – газовой хроматографии. IRMS – изотопной масс-спектрометрии.

личных газоматеринских источников. Показатель $M_{ув}$ (г/моль) представляет из себя суммарную величину, средневзвешенных масс индивидуальных компонентов углеводородной фракции C_1-C_5 (Велев, 1981; Гресов, 2011). Значения коэффициента “влажности” рассчитывались по формуле (Abrams, 2005):

$$K_{вл} = \Sigma C_2-C_5 : \Sigma C_1-C_5 \times 100\%, \quad (1)$$

где C_1-C_5 – весовые концентрации метана и его гомологов, нормированные по отношению к $M_{ув}$ в долях на 1000.

Для определения генезиса газов в работе использованы данные масс-спектрометрии изотопных отношений (IRMS) $\delta^{13}C-CH_4$, $\delta^{13}C-C_2H_6$ и $\delta^{13}C-CO_2$ (Гресов и др., 2016, 2020a), установленные в лабораториях ДВГИ ДВО РАН, ВСЕГИИ и Университета Хоккайдо на масс-спектрометрах Finnigan MAT-253, Deltaplus XL (с приставкой GC Combustion III), выполненные по аттестованным и оптимизированным для исследований методикам (Velivetskaya et al., 2015).

Статистическая обработка результатов выполнена с использованием программного пакета “STATISTICA” 10.0. Оцифровка и интерпретация результатов исследований производилась в программном комплексе ESRI@ArcGIS с помощью

модуля Geostatistical Analyst по методу обратных взвешенных расстояний (IDW).

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В геоструктурном отношении район исследований (рис. 1) представлен Северной структурной террасой, поднятиями Лонга и Кучерова, Ломоносово-Менделеевской флексуры-разломной зоны и прогибом Вилькицкого, в пределах которого сформировался Предвосточносибирский осадочный бассейн (котловины Подводников СЛО).

Исследуемый район ВСМ и СЛО почти круглогодично покрыт ледовым покровом, и лишь в летне-осенний период эпизодически освобождается ото льда, что определяет труднодоступность проведения научно-исследовательских работ.

Суммарное направление движения вод района предопределяется взаимодействием постоянных и дрейфовых течений, создающих сложную схему их движения. Среди последних главенствуют тихоокеанские течения, поступающие с юго-востока со стороны Берингова пролива, и лишь на северо-западе проникают атлантические воды со стороны Новосибирских островов (Кошелева, Яшин, 1999).

Течения западной части района исследований, встречаясь с потоком распресненных вод Инди-

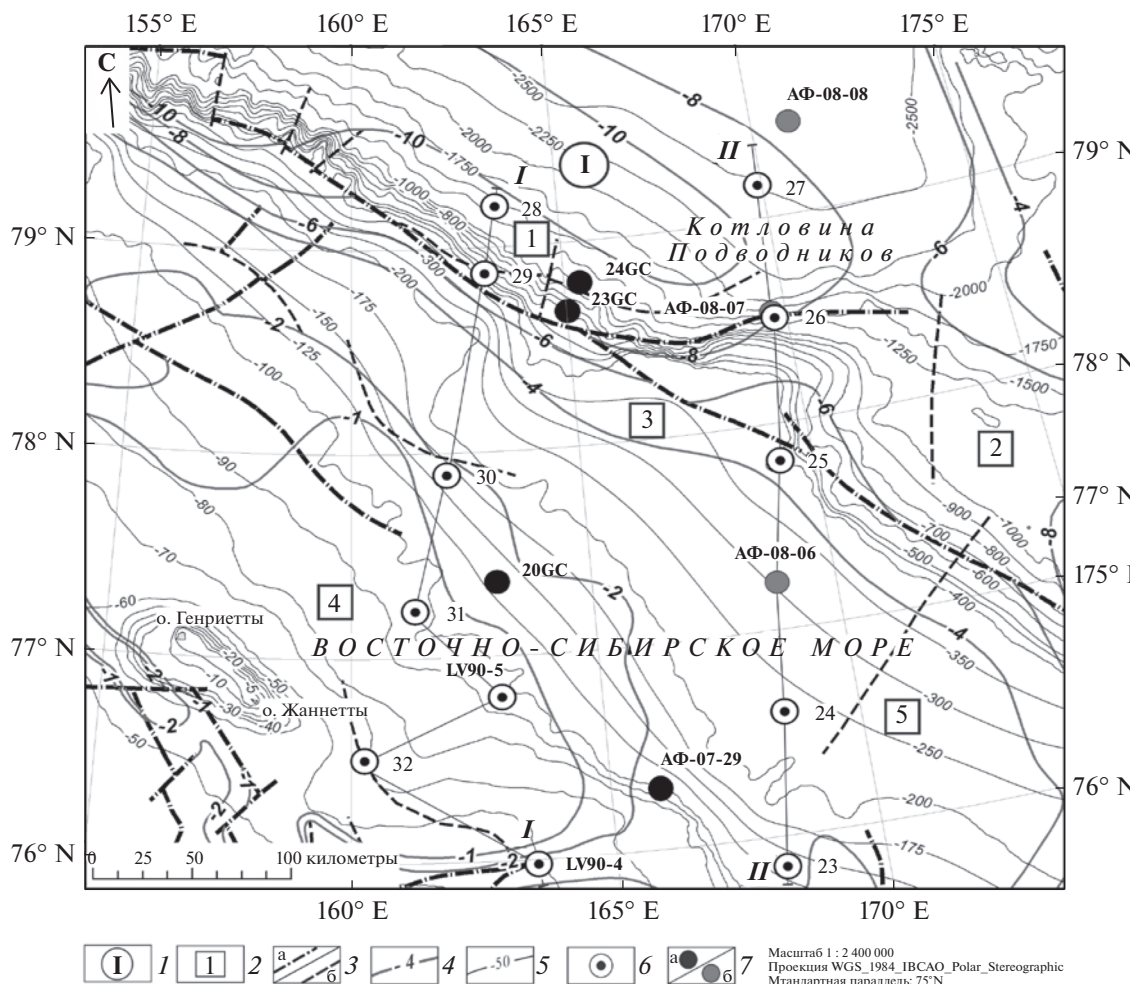


Рис. 1. Структурно-тектоническая карта (Государственная..., 2015, 2016) и схема геохимического опробования района исследований: *I* – Предвосточносибирский осадочный бассейн (Хаин и др., 2009). *2* – геоструктуры: 1 – прогиб Вилькицкого, 2 – поднятие Кучерова, 3 – Ломоносово-Менделеевская флексура-разломная зона, 4 – поднятие Лонга, 5 – Северная структурная терраса. *3* – тектонические нарушения: а – установленные, б – предполагаемые. *4* – изолинии мощности осадочного чехла, км. *5* – изобаты, м (–200 м – верхняя граница континентального склона). Донные станции и их номера: б – газового и геохимического опробования LV-77, LV-90. 7 а – датировки возраста осадков, станции 20GC, 23GC, 24GC проект SWERUS-C3 “IB Oden” (O’Regan et al., 2017), АФ-07-29 (Гусев и др., 2013); б – литолого-химического и биохимического опробования АФ-07-29, 08-06, 08-07, 08-08 (Петрова и др., 2018). *I–I* и *II–II* – газогеохимические профили.

гирки (рис. 2), создают общее выносное движение к северу, неся значительную массу взвешенного вещества (Романкевич, Ветров, 2001; Севастьянов и др., 2019). Развитие течений Арктического бассейна ограничено материковым склоном, прижимаясь к которому, оно увлекает воды на север и северо-запад – в сторону Гренландского моря, становясь элементом системы трансарктических течений. Течения в котловине Подводников образуют круговое движение вод, вероятно, с застойной зоной в ее центре (Атлас Арктики, 1985; Государственная..., 2015).

Внешний шельф района исследований представлен субгоризонтальной и сменяющей ее наклонной равниной, осложненной островными

поднятиями Жаннетты и Генриетты. Однообразие равнины нарушается выступом Де-Лонга и сетью подводных долин, преимущественно параллельных между собой (Гусев и др., 2012). Крайинно-шельфовая зона ВСМ представлена территорией внешнего шельфа и бровки шельфа, ограниченной изобатами –100 и –200 м. Начиная с глубин 300 м, уклоны возрастают. Максимальные уклоны начинаются с отметок 500–700 м, достигая значений 0.07°. В котловине Подводников глубины моря превышают 2500 м. Верхняя терраса и подножье котловины трассируется на глубинах 1200–2000 и 2100–2400 м (Казанин и др., 2017).

По данным (O’Regan et al., 2017) установлено, что в пределах внешнего шельфа (поднятие Лон-

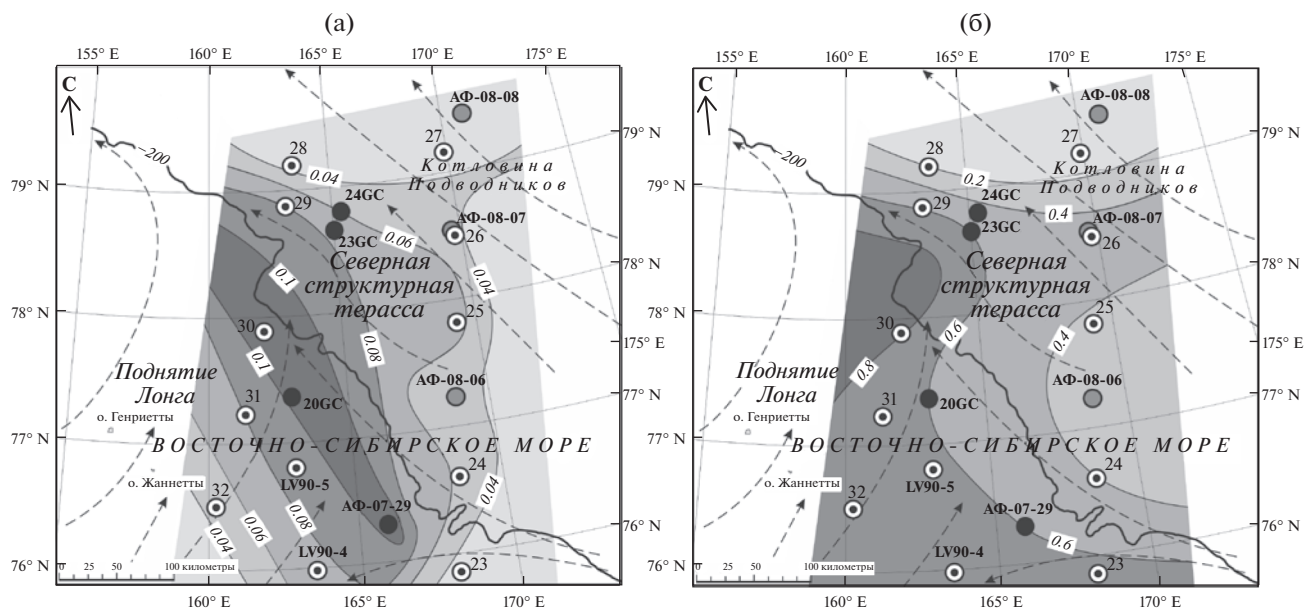


Рис. 2. Схематическая карта течений (Атлас Арктики, 1985) и распределения содержаний $C_{\text{карб}}$ (а) и $C_{\text{орг}}$ (б) в осадках района исследований (в %); изобата -200 м – бровка шельфа.

га, рис. 1) возраст донных осадков станции 20GC (глубина моря 115 м, длина керна 83 см) в интервале 56–58 см составляет 12.04 тыс. радиоуглеродных лет; 72–81 см – 12.52–13.21. Аналогично для осадков станций 23GC и 24GC континентального склона (глубина 508 и 964 м, длина керна 406 и 405 см) на глубине 177 и 192 см от донной поверхности – 37.0 и 46.3 тыс. лет (cal years BP). Исходя из материалов (Гусев и др., 2013), верхние 47 см керна осадков станции АФ-07-29 (рис. 1), расположенной на бровке шельфа, представлены голоценовым мягкопластичным алевропелитом, нижний интервал керна 47–191 см – серым тугопластичным твердым полусухим пелитом. Радиоуглеродный (AMS ^{14}C) анализ по раковине моллюска *Portlandia arctica* (Gray) в интервале 130 см показал запредельную датировку осадков – >44 тыс. лет. В этой же работе для датирования возраста осадков также применялся метод избыточного ^{230}Th . Установленный возраст осадков интервала 47–52 см станции АФ-07-29 по данным этого метода составил 181 тыс. лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Литолого-геохимические исследования

Основная часть позднеплейстоценовых донных отложений внешнего шельфа (станции 23, 31, 32, 4, 5, рис. 1) представлена восстановленными серыми, темно-серыми или черными алевропелитовыми осадками. Здесь же в осадках отмечен запах сероводорода и уплотненные комки черного цвета с аморфными сульфидами железа (гид-

ротроилита). Окисленные светло коричневые, коричневые, бурые и зеленоватые пелитовые отложения, характерные для всей глубоководной части СЛО, появляются лишь на бровке шельфа (станция 30), континентальном склоне и котловине Подводников. В кернах станций 26, 28, 29 установлены до девяти пачек разноокрашенных разновидностей и до шести явно видимых перерывов осадконакопления с признаками переотложения осадков в верхней части разреза. Исходя из данных глубины опробования осадков (табл. 1) и результатов датировки (Гусев и др., 2013; O'Regan et al., 2017), все изученные отложения донных станций характеризуются позднеплейстоценовым возрастом формирования. Исключение составляют осадки станции 30, возраст которых, предположительно, относится к раннеголоцено-позднеплейстоценовому времени.

Плейстоценовые отложения внешнего шельфа и континентального склона в интервале опробования 0.8–3.1 м относятся к алевропелитовому типу осадков со средним содержанием алевроитовой фракции 51 и 56% соответственно. Уменьшение среднего содержания алевроитовой фракции от 42 до 46% установлено в осадках котловины Подводников и бровки шельфа в интервале опробования 0.4–3.2 м, где наблюдается доминирование пелитовой фракции (табл. 2). Среднее содержание псаммитовой фракции в осадках составляет на внешнем шельфе 2.5%, бровка шельфа – 0.6, континентальном склоне и котловины Подводников – 0.4% (табл. 2). Каменный материал в изученных плейстоценовых отложениях представлен незначительным количеством гравия и гальки: в

Таблица 2. Результаты определения средних значений гранулометрического состава, водно-физических свойств и содержания биогенных компонентов в плейстоценовых осадках района исследований

Показатели	Окраинно-шельфовая зона		Континентальный склон	Верхняя терраса, котловина
	внешний шельф	бровка шельфа		
№/№ станций	4, 31, 32	5, 23, 30*	24, 25, 29	26, 27, 28
Глубина моря, м	57–100	104–140	248–370	1365–2565
Интервалы опробования, см	60–310	40–110	100–320	380–475
Гранулометрический состав и водно-физические свойства осадков				
Пелит, %	46.7	53.0	43.2	57.8
Алеврит, %	50.8	46.4	56.4	41.8
Псаммит, %	2.5	0.6	0.4	0.4
Естественная влажность, %	26.2	27.5	29.0	37.3
Естественная плотность, г/см ³	1.79	1.77	1.82	1.60
Плотность сухого осадка, г/см ³	1.30	1.30	1.29	1.01
Медианный диаметр, мкм	4.65	3.88	5.29	3.33
Содержание биогенных компонентов, %				
C _{карб}	0.07	0.07	0.05	0.03
C _{орг}	0.72	0.75	0.25	0.20
C _{общ}	0.79	0.82	0.30	0.23

* Данные станции 30 отнесены к условно представительным.

пределах 0.1–1.0% и повторяет в районе исследований характер распределения повышенных содержаний псаммитовой фракции.

Установлено, что содержание псаммитовой фракции плейстоценовых отложений коррелируется прямой связью с показателями C_{карб} (0.50) и естественной плотности осадков (0.63), содержаниями Ca (0.55), Ba (0.62), Si и Sr (0.69); обратной (–0.5...–0.6) – Y, P, Sc и пелитовой фракции, (–0.6...–0.7) – Mn, Zn, Al, Fe, Mg, Ti и влажности осадков.

Содержание алевритовой фракции связано прямой корреляционной связью (0.5–0.6) с содержанием в осадках Se, Al, Cu и C_{карб}, обратной (–0.5...–0.6) – Na и глубиной моря, (–0.71) – показателями титанового модуля и (–0.96) – пелитовой фракции.

Содержание пелитовой фракции характеризуются прямой корреляционной связью (0.5–0.6) с глубинами моря и опробования, Na, Fe, Zn и значениями алюмосиликатного (0.6) и титанового (0.77) модулей; обратной – с содержаниями Si (–0.71).

В процессе исследований установлено, что средние значения естественной влажности осадков (W_о) закономерно возрастают от 26 до 37% в направлении “шельф–пелагиаль” и характеризуются высокой прямой корреляционной связью с глубиной моря (0.60); и обратной связью – с глубиной опробования (–0.51), содержанием C_{карб} (–0.60), псаммитовой фракции (–0.7) и значениями есте-

ственной (–0.73) плотности осадков. При этом показатели влажности характеризуется прямой корреляционной связью (0.5–0.6) с концентрациями в осадках Ag, Be, Ga, Ge, Rb, Nb, Cu, Sb; (0.6–0.7) – Li, Co, As, Sn, W, K, Cr, Y, U; (0.7–0.8) – P, Cs, Mo, Mg; (0.8–0.9) – V, Sc, Ni, Zn, Ti; Fe; (>0.9) – Al и алюмосиликатного модуля. Обратная корреляционная связь (–0.55) наблюдается между показателями влажности и концентрациями Ba, (–0.7...–0.8) – Sr, Ca и (–0.87) – Si.

Максимальными показателями естественной и сухой плотности донных отложений характеризуются осадки континентального склона, внешнего шельфа и его бровки, минимальными – котловины Подводников (табл. 2). Плотность осадков связана прямой корреляционной связью с содержанием псаммитовой фракции, концентрациями Ca и Sr (0.52), Si (0.71) и обратной (–0.5...–0.6) – P, Cd, Ga, Rb, As, Ag, Ta, K, Cu, U и глубиной моря, (–0.6...–0.7) – Nb, Li, Be, Ge, Sn, Cs, Mg, Cr, W, Fe, Ti, (–0.7...–0.8) – V, Co, Mo, Ni, Al, а также показателями алюмосиликатного модуля и влажности.

Минимальные показатели медианных диаметров установлены в осадках котловины Подводников и бровки шельфа, максимальные – внешнего шельфа и континентального склона. Установлено, что изменчивость значений этого показателя определяется в основном вариациями гранулометрического состава (табл. 2).

Установлено, что плейстоценовые отложения окраинно-шельфовой зоны района исследований представлены бескарбонатными и слабокарбонатными осадками с содержанием $C_{\text{карб}}$ – 0.03–0.16% (в среднем 0.07%), континентального склона – 0.02–0.09 (0.05) и котловины Подводников – 0.02–0.08% (0.03%). В целом, в распределении $C_{\text{карб}}$ отчетливо выделяются зоны относительно повышенных содержаний в алевропелитах поднятия Лонга – 0.08–0.10% вдоль бровки внешнего шельфа (изобаты –200 м), 0.04–0.06 – Северной террасы и минимальных – 0.02–0.04% – в пелитах котловины Подводников. Линейно-площадной характер трансформации $C_{\text{карб}}$ вдоль бровки шельфа обусловлен морфологическими и гидродинамическими особенностями района исследований в области соединения и смешивания тихоокеанских и атлантических вод (рис. 2а).

Установлено, что содержание $C_{\text{карб}}$ плейстоценовых отложений характеризуется прямой корреляционной связью (0.5–0.6) с содержаниями псамитовой и алевритовой фракций, концентрациями Si, Sr, Ca; обратной – (–0.6...–0.7) – Al, Zn, Fe, содержанием пелитовой фракции, влажности осадков; (–0.7...–0.8) – с показателями алюмосиликатного и титанового модулей.

Максимальными содержаниями $C_{\text{орг}}$ 0.6–0.9% характеризуются осадки внешнего шельфа с максимумом содержаний в северной части поднятия Лонга, минимальными – 0.2% и менее – котловины Подводников. Промежуточное положение занимают отложения континентального склона Северной структурной террасы – 0.4–0.6% (рис. 2б). Установлено, что содержание $C_{\text{орг}}$ в осадках характеризуется прямой корреляционной связью с концентрациями Ba ($R^2 = 0.7$), Ca и Sr (0.51–0.54), обратной – с содержаниями P, As (–0.83...–0.89), Ti, Fe (–0.61...–0.65), Sc, W, Mg, Li (–0.5...–0.54), глубинами моря и опробования (–0.63...–0.69).

В результате анализа распределения химического состава плейстоценовых осадков выделены четыре основные группы геохимических ассоциаций (табл. 3). Химические элементы *первой* группы (Sr, Ba и Si) характеризуются максимальными содержаниями в осадках внешнего шельфа, минимальными – котловины Подводников.

Максимальные концентрации *второй* группы химических элементов наблюдаются в пределах бровки внешнего шельфа. В зависимости от распределения минимальных содержаний элементов группа подразделяется на две подгруппы. К первой подгруппе относятся Cd, Pb, Hg и Ca, минимумы концентраций, которых установлены в осадках верхней террасы и котловины Подводников, второй – U и W – внешнего шельфа. Распределение концентраций Pb в плейстоценовых отложениях района исследований приведено на рис. 3г.

Максимум содержаний элементов *третьей* группы ассоциируется с осадками континентального склона и разделяется на две подгруппы. К первой подгруппе отнесены Y, Cu, Zn и Ti с минимальными содержаниями в пределах внешнего шельфа, второй – Ag, Tl, Ta, Be, Nb, Zr и K, а также редкоземельных элементов (РЗЭ) – Lu, Tm, Tb, Ho, Eu, Yb, Er, Dy – бровки шельфа (табл. 3). Распределение концентраций Cu, Zn и Be в осадках района исследований приведено на рис. 3а–3в.

Химические элементы *четвертой* группы характеризуются максимальными содержаниями в осадках верхней террасы и котловины Подводников, минимальными – в пределах окраинно-шельфовой зоны ВСМ. В зависимости от распределения минимумов концентраций элементов группа также подразделяется на две подгруппы (4.1 и 4.2). Первая подгруппа – Fe, Mg, Mn, P, Cr, Mo, Ni, Cs, Co характеризуется минимальными концентрациями в осадках внешнего шельфа (рис. 4), вторая – Al, Sb, Hf, As, Th, Ga, Sc, Sn, Li, Rb, V и редкоземельных элементов – Gd, Sm, Pr, Nd, La, Ce – его бровки (рис. 5).

Аналогичное распределение характерно для суммарных концентраций РЗЭ и средних значений титанового (от 11.0 до 12.3), алюмосиликатного (от 0.272 до 0.313) и железомарганцевого (от 0.010 до 0.029) модулей (табл. 3).

Газогеохимические исследования

Концентрации *метана* в плейстоценовых отложениях района исследований изменяются от 0.002 до 0.102 см³/кг. Максимальными концентрациями (до 0.102 см³/кг) характеризуются осадки внешнего шельфа, минимальными – (0.002 см³/кг) – бровки шельфа и континентального склона, промежуточными значениями – (до 0.051 см³/кг) – верхней террасы и котловины Подводников. Установлено, что значения концентраций CH₄ в осадках связаны высокой прямой корреляционной связью с содержанием в них Cu, Mo, K ($R^2 = 0.76–0.84$), Sb, Y (0.63–0.66), Cr, Al, U (0.51–0.58) и обратной – Sr и Ca (–0.51...–0.55).

Суммарные концентрации *гомологов метана* в осадках (до C₅ включительно) изменяются от 0.0003 до 0.0056 см³/кг, при этом максимальные значения концентраций установлены на континентальном склоне и в котловине Подводников, минимальные – бровке шельфа, промежуточные – внешнем шельфе (табл. 3). Суммарные концентрации гомологов метана плейстоценовых отложений района исследований характеризуется прямой корреляционной связью с концентрациями CH₄ (0.71), As (0.66), Ge, Mo, Pb, Cu, Th (0.54–0.58) и обратной – с содержаниями в осадках $C_{\text{карб}}$, Cd, (–0.51...–0.54), значениями показателей плотности осадков и железомарганцевого модуля (–0.53).

Таблица 3. Средние геохимические показатели плейстоценовых отложений района исследований

Показатели	Окраинно-шельфовая зона		Континентальный склон	Верхняя терраса, котловина
	внешний шельф	бровка шельфа		
№/№ станций	4, 31, 32	5, 23, 30*	24, 25, 29	26, 27, 28
Глубина моря, м	57–100	104–140	248–370	1365–2565
Интервалы опробования, см	60–310	40–110	100–320	380–475
Средние концентрации химических элементов (мг/кг) и значений геохимических модулей				
1. Sr, Ba, Si	199, 632, 302400*	198, 626, 294406	174, 579, 285706	172, 556, 279739**
2.1. Cd, Pb, Hg, Ca	0.17, 23.1, 26, 6013	0.22, 24.2, 30, 7862	0.20, 23.0, 28, 4924	0.15, 21.6, 15, 4798
2.2. W, U	1.36, 2.22	1.72, 2.50	1.50 2.48	1.55, 2.25
3.1. Y, Cu, Zn, Ti	20.1, 23.3, 98, 3378	21.0, 24.6, 105, 3547	25.0, 30.9, 114, 4392	23.3, 23.5, 113, 4218
3.2. Ag, Tl, Ta, Be, Nb, Zr, Lu, Tm, Tb, Ho, Eu, Yb, Er, Dy	0.25, 0.61, 0.72, 2.42, 9.5, 114, 0.34, 0.34, 0.76, 0.83, 1.23, 2.3, 2.4, 4.1	0.23, 0.56, 0.69, 2.28, 9.3, 97, 0.32, 0.33, 0.70, 0.77, 1.19, 2.2, 2.3, 3.9	0.27, 0.70, 0.83, 2.50, 11.8, 128, 0.39, 0.42, 0.83, 0.89, 1.43, 2.6, 2.64, 4.5	0.26, 0.64, 0.80, 2.46, 11.4, 120, 0.36, 0.38, 0.84, 0.88, 1.42, 2.5, 2.52, 4.3
К	25608	24177	27222	27180
4.1. Mo, Cs, Co, Ni, Cr, P, Mn, Mg, Fe	1.38, 6.9, 13.6, 31.2, 63, 700, 388, 10018, 38245	2.18, 7.1, 13.8, 33.2, 69, 723, 542, 11617, 39878	2.25, 7.3, 15.7, 37.3, 82, 810, 817, 12349, 47613	2.85, 7.5, 17.0, 38.9, 85, 867, 1376, 12747, 50567
4.2. Sb, Hf, Sn, As, Th, Ga, Sc, Li, Gd, Sm, Pr, Nd, La, Ce, Rb, V, Al	0.91, 2.2, 2.9, 14.5, 10.1, 19.5, 12.8, 56.2, 5.0, 5.8, 7.5, 27.2, 31.4, 65, 124, 129, 81938	0.74, 2.0, 2.7, 14.2, 9.6, 18.2, 12.6, 48.8, 4.8, 5.4, 7.0, 27.0, 29.8, 60, 111, 125, 80501	0.84, 2.4, 3.1, 18.3, 12.4, 21.1, 15.3, 58.1, 5.8, 6.6, 8.7, 33.0, 29.9, 70, 134, 148, 86393	0.92, 2.43, 3.2, 22.5, 12.4, 21.2, 15.5, 59.6, 5.9, 6.7, 8.8, 33.2, 36.1, 75, 137, 169, 87068
Σ PЗЭ	158	146	174	179
Al/Si	0.272	0.296	0.303	0.313
Mn/Fe, Mn + Fe/Ti	0.010, 11.0	0.015, 11.1	0.018, 11.3	0.029, 12.3
Средние значения концентраций газов (см ³ /кг) и газогеохимических показателей				
CH ₄ , см ³ /кг	0.029	0.015	0.016	0.022
ΣC ₂ –C ₅ , см ³ /кг	0.0018	0.0016	0.0027	0.0026
M _{ув} , г/моль	19.2	20.2	23.3	22,1
K _{вл} , ‰	26.7	32.5	50.2	48.4
δ ¹³ C-CH ₄ , ‰	–42.4	–45.4	–40.4	–39.9
δ ¹³ C-C ₂ H ₆ , ‰	–20.8	–21.5	–18.7	–18.3
CO ₂ , см ³ /кг	1.77	4.97	1.39	1.97
δ ¹³ C-CO ₂ , ‰	–20.1	–21.4	–19.2	–19.8

Примечания. 305236* – максимальные значения, 279739** – минимальные.

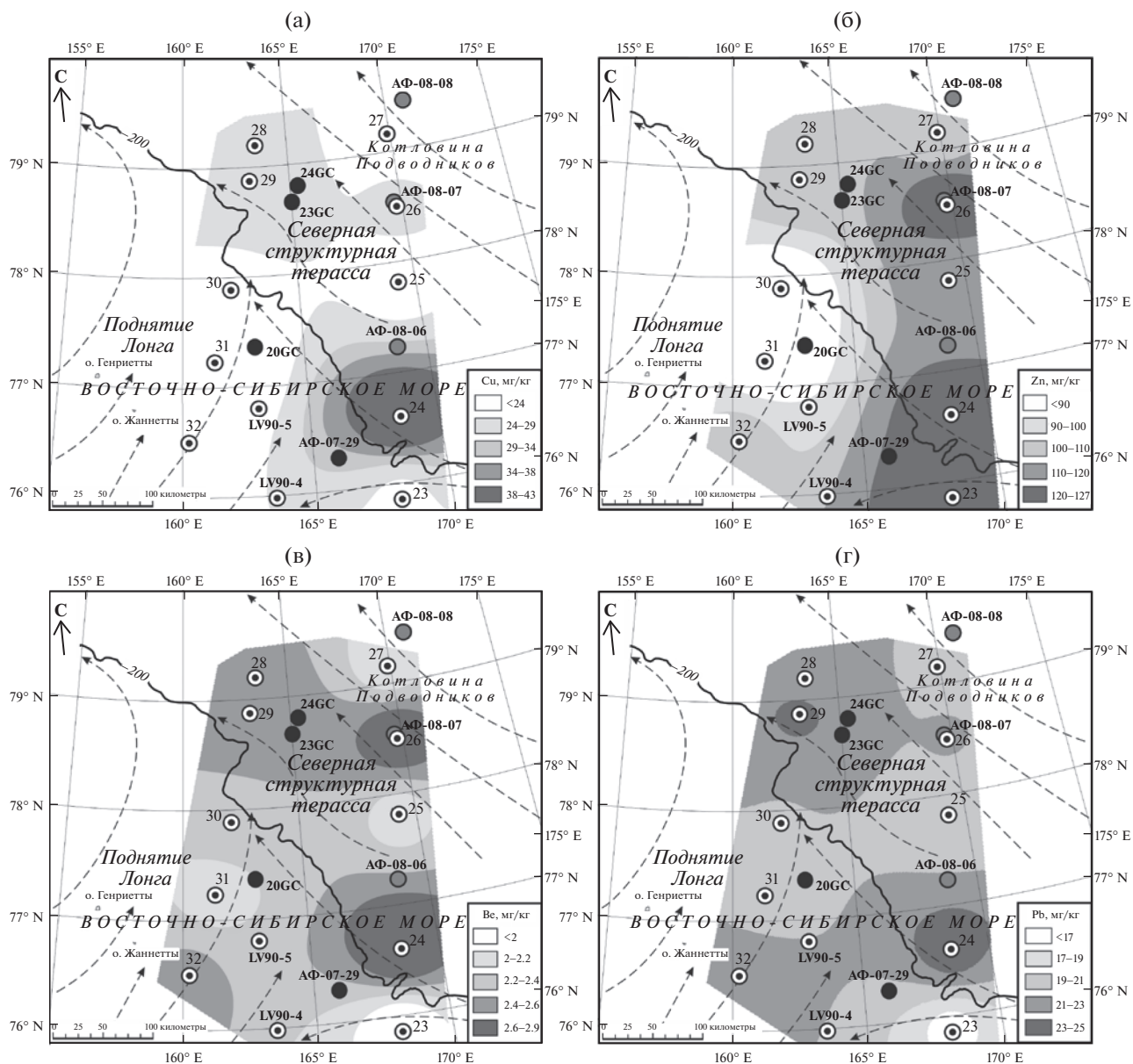


Рис. 3. Распределение концентраций Cu (а), Zn (б), Be (в) и Pb (г) в плейстоценовых осадках района исследований.

Концентрации углекислого газа в плейстоценовых отложениях варьируют в пределах 0.5–5.5 см³/кг с максимумом их значений в осадках бровки шельфа, минимумом – континентального склона. Промежуточными показателями характеризуются осадки внешнего шельфа, верхней террасы и подножья котловины Подводников (табл. 3). Значения концентраций CO₂ связаны прямой корреляционной связью с содержаниями в осадках Ва, C_{орг} (0.56); обратной – Mn (–0.72), Mg (–0.62), Fe, Ti (–0.51...–0.57), значениями железомарганцевого модуля (–0.6), глубинами моря и опробования (–0.53).

Установлено (Гресов и др., 2020а), что изотопный состав углерода δ¹³C-CH₄ и C₂H₆ плейстоце-

новых отложений района исследований изменяется в пределах –51...–36‰ и –25...–17‰ соответственно. В осадках континентального склона средние значения δ¹³C-CH₄ и C₂H₆ составляют –40.4 и –18.7‰, котловины Подводников – –39.9 и –18.3‰, внешнего шельфа – –42.4 и –20.8‰ и его бровки – –45.4 и –21.5‰. Показатели δ¹³C-CO₂ внешнего шельфа характеризуется значениями –22...–19‰, континентального склона и котловины Подводников – –21...–18‰ (табл. 3).

Показатели изотопного состава углерода δ¹³C-CH₄ связаны высокой прямой корреляционной связью с глубинами моря и опробования (R² = 0.67–0.8) и концентрацией в осадках P (0.7), обратной – с содержаниями в плейстоценовых

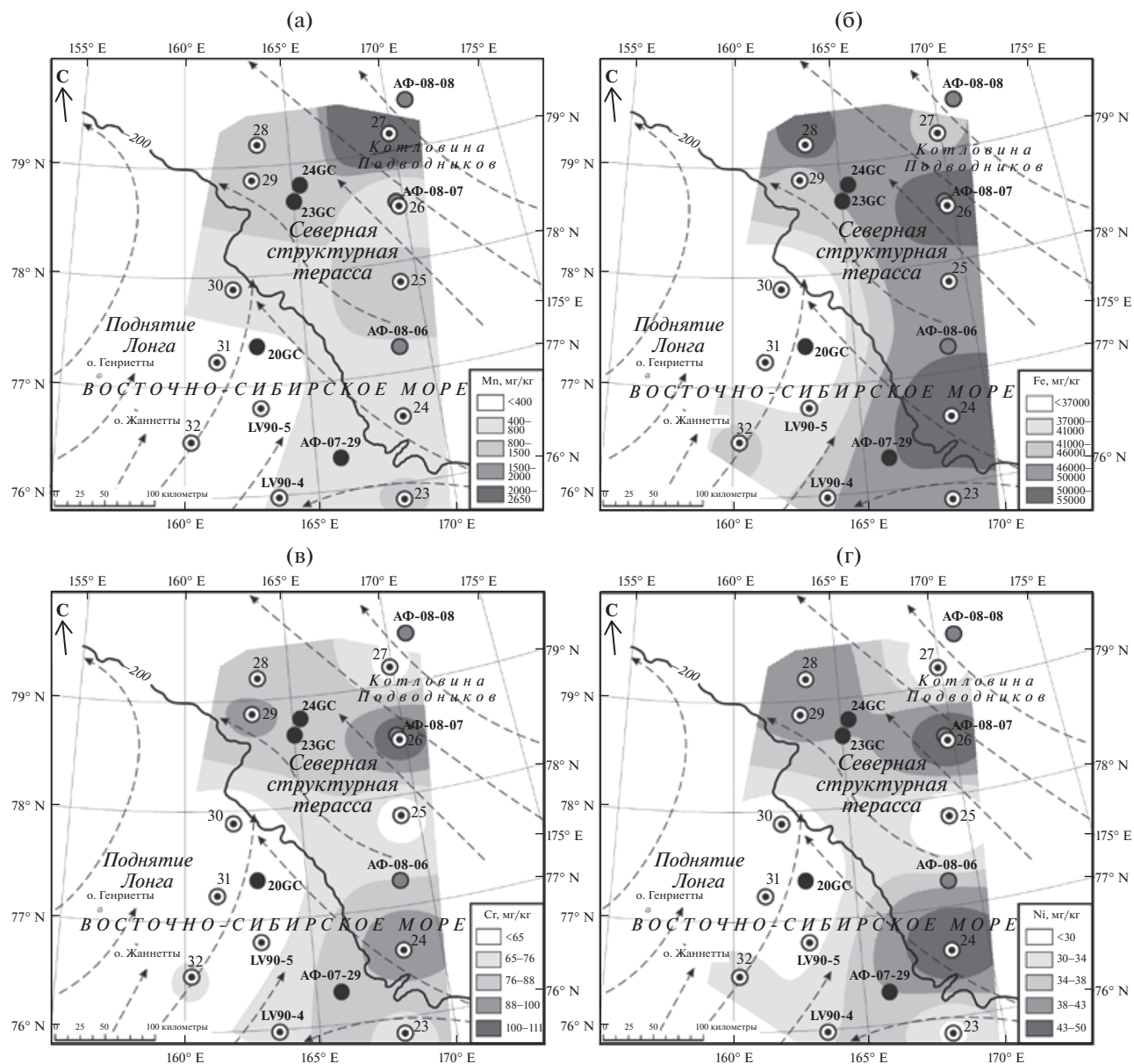


Рис. 4. Распределение концентраций Mn (а), Fe (б), Cr (в) и Ni (г) в плейстоценовых осадках района исследований.

осадках U, Hg, Ba и C_{org} ($-0.61...-0.70$). Значения изотопного состава углерода $\delta^{13}C-C_2H_6$ характеризуется прямой корреляционной связью с содержаниями Sn, Ga, Hf, Ag, Li ($0.61-0.69$), V, Sc, Cs, Rb ($0.51-0.58$), глубинами моря и опробования ($0.51-0.57$), обратной – с концентрациями CH_4 (-0.65), Na и K (-0.62 и -0.7). Показатели $\delta^{13}C-CO_2$ связаны высокой прямой корреляционной связью с концентрациями Ag (0.82), Sn, Cs, Ga, Li ($0.61-0.68$), Be, W, Rb, Sc ($0.51-0.57$), значениями $\delta^{13}C-C_2H_6$ (0.87) и обратной – с содержанием Na (-0.63).

В процессе исследований установлено, что показатели коэффициента “влажности” и молеку-

лярной массы УВ-фракции изменяются в пределах $10.5-69.7\%$ и $17.15-27.5$ г/моль. Максимальными значениями M_{UV} и $K_{вл}$ характеризуются плейстоценовые отложения континентального склона и верхней террасы котловины Подводников, минимальными – внешнего шельфа, промежуточными – бровки шельфа (табл. 3). Молекулярная масса УВ-фракции и коэффициент “влажности” связаны высокой взаимной прямой корреляционной связью ($R^2 = 0.98$) и показателями $\delta^{13}C-C_2H_6$ ($0.87-0.89$) и $\delta^{13}C-CO_2$ ($0.64-0.67$), содержаниями Hf ($0.5-0.56$) и глубиной опробования осадков ($0.5-0.56$); обратной – с концентрациями U ($-0.65...-0.73$), CH_4 ($-0.71...-0.74$), Na, K ($-0.68...-0.73$), U ($-0.65...-0.73$), Mo, Sb ($-0.51...-0.53$).

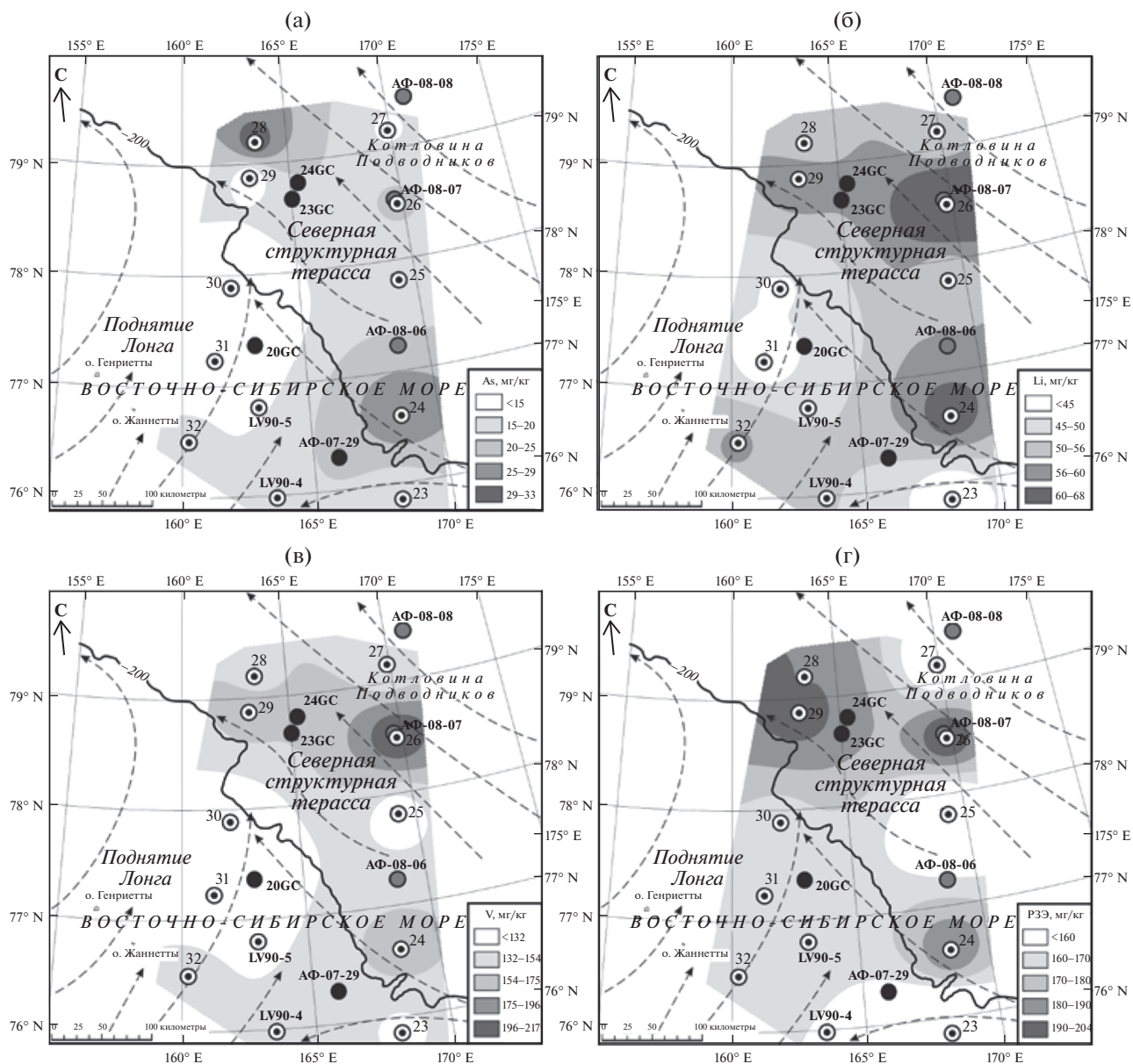


Рис. 5. Распределение концентраций As (а), Li (б), V (в) и P3Э (г) в плейстоценовых осадках района исследований.

Нефтегазоносность

Как указывалось ранее, показатели молекулярной массы УВ-фракции и коэффициента “влажности” являются индикаторами генетических особенностей УВГ различных газоматеринских источников. Исходя из установленных значений $M_{УВ}$, $K_{ВЛ}$ (рис. 6) и данных работ (Гресов, 2011, 2012; Гресов, Яцук, 2020б, 2020в), в плейстоценовых отложениях района исследований выделяются УВГ нескольких газоматеринских источников.

Для предполагаемых конденсатногазовых залежей – $M_{УВ}$ – 17.2 г/моль и $K_{ВЛ}$ – 10.5% (станция 4) и

твердых битумов поднятия Лонга – 17.6–17.9 и 15.2–16.4 (станция 5, 23), предполагаемых нефтегазовых залежей Северной структурной террасы, поднятия Лонга и подножья котловины Подводников – 19.4–20.2 и 28.6–35.6 (станции 24, 27, 31), газонефтяных – поднятия Лонга – 21.5–22.8 и 44.1–49.8 (станции 30, 32) и нефтяных – Предвосточносибирского осадочного бассейна и Ломоносово-Менделеевской флексуры-разломной зоны – 23.1–27.5 г/моль и 52.4–69.7% (станции 25, 26, 28, 29, см. рис. 1). Распределение значений показателей $M_{УВ}$ и $K_{ВЛ}$ УВГ плейстоценовых отложений района исследований по газогеохимическим профилям I–I и II–II приведено на рис. 6.

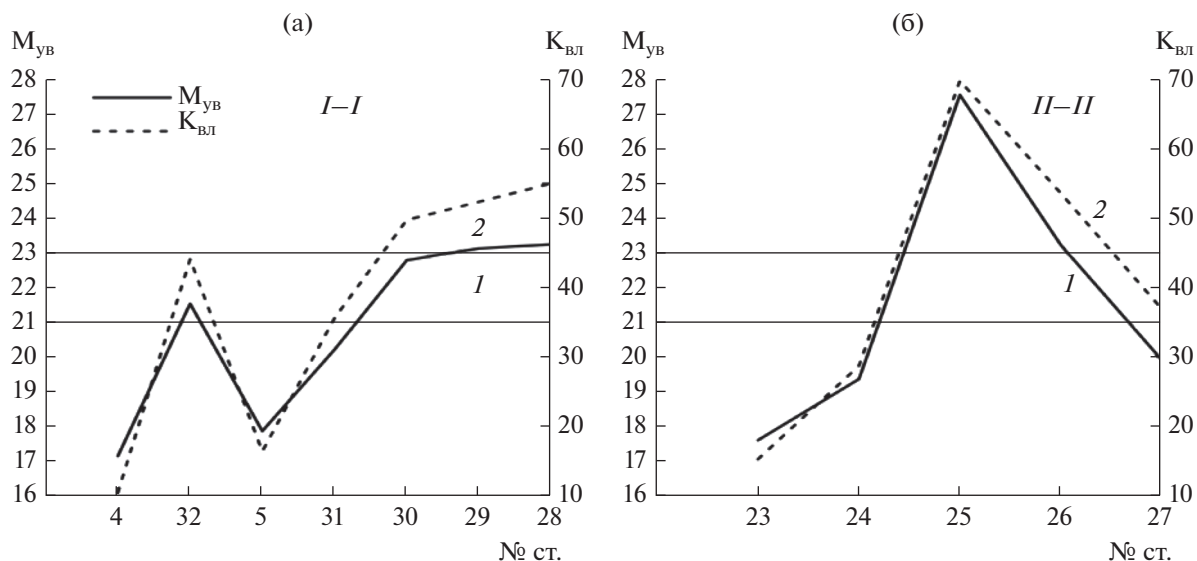


Рис. 6. Распределение показателей $M_{УВ}$ и $K_{ВЛ}$ УВГ плейстоценовых отложений донных станций газеохимических профилей I–I, II–II (рис. 1): 1 – установленный интервал значений $M_{УВ}$ и $K_{ВЛ}$ УВГ прогнозных газонефтяных залежей, 2 – нефтяных.

Таким образом, основные перспективы нефтегазоносности связаны с осадочными отложениями северной части Северной структурной террасы, Ломоносо-Менделеевской флексуры-разломной зоны и Предвосточносибирского бассейна.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Повышенное содержание пелитовой составляющей в изученных осадках обусловлено подледно-морскими условиями седиментации, морфологией дна и особенностями гидродинамического режима (Павлидис, Щербаков, 2000), вследствие этого, основным процессом седиментации и накопления осадков является гравитационное осаждение глинистых частиц. Важно отметить, что при существующем объеме геологических данных не удастся уверенно выявить соотношение денудационных и аккумулятивных составляющих гравитационных процессов на внешнем шельфе и континентальном склоне. В ходе их развития это соотношение менялось в зависимости от исторического положения береговой линии. На побережье ВСМ фиксируются четыре морских трансгрессии (миоценовая, позднеплиоценовая, средне-позднеплейстоценовая и голоценовая) и разделяющие их регрессии. В регрессивные этапы, когда береговая линия располагалась ближе к бровке шельфа, возрастал объем осадочного материала, вовлеченного в мутьевые потоки, увеличивалась и их эродирующая способность. При этом, в течение кайнозойского периода произошли основные климатические изменения от теплого и влажного климата в палеоцене–эоцене к умеренному в олигоцене–миоцене и суровому арктическому в четвертичном периоде, что без-

условно повлияло на процессы седиментогенеза и распределение $C_{орг}$ и $C_{карб}$ в плейстоценовых отложениях (Дегтяренко и др., 1982; Павлидис, Щербаков, 2000; Геология..., 2003; Государственная..., 2015).

Основными источниками ОВ в ВСМ по данным (Ветров и др., 2008) являются первичная фотосинтетическая продукция – 15 млн т $C_{орг}$ /год, продукты волновой абразии и термоабразии берегов – 2.2, речной сток – 1.9, эоловые поступления – 0.16 и подземный сток – 0.1 млн т $C_{орг}$ /год. В работе (Sakshaug, 2004) вклад первичной продукции оценивается в два раза выше (30 млн т $C_{орг}$ /год). В любом случае, автохтонное поступление ОВ значительно превышает объемы его приноса с материкового и островного обрамления ВСМ. Важно отметить, что в донных осадках соотношение аллохтонного и автохтонного ОВ существенно отличается от соотношения, поступающего в море ОВ вследствие различной устойчивости к разложению свежего морского ОВ и терригенного ОВ, потерявшего часть лабильных соединений, представленного более устойчивыми его компонентами (Ветров и др., 2008).

Наряду с вышеуказанными данными о значительном вкладе первичной продукции ОВ, содержания $C_{орг}$ и $C_{карб}$ в изученных осадках указывают на незначительную органическую насыщенность и низкую степень биогенного карбоната накопления в плейстоценовых донных отложениях района исследований, что подтверждается данными (Петрова и др., 2018). Аналогичная картина наблюдается и в Чукотском море, где в поверхностных осадках и морских верхнечетвертичных отложениях содержание $C_{карб}$ не превышает десятых до-

Таблица 4. Молекулярный состав ОВ осадков района исследований по данным (Петрова и др., 2018)

Показатели	Окраинно-шельфовая зона	Континентальный склон	Котловина Подводников
№/№ станций	АФ-07-29	АФ-08-06, 08-07	АФ-08-08
Глубина моря, м	192	300–1250	2560
Длина керна, см	191	258–300	250
СРІ ₂₃₋₃₃	2.98	2.27*	2.38
С ₁₇ /С ₂₇	0.33	0.76*	0.58
ОЕР ₁₇₋₁₉	1.30	0.77*	0.74
ОЕР ₂₇₋₃₁	4.11	4.23*	4.34
Pr/Ph	0.81	0.87*	0.92
Lithis/Σn-alk	0.32	0.36*	0.44

* Средние значения по станциям.

лей процента (Астахов и др., 2013). Повышенные содержания $C_{орг}$ в южной части района исследований, по-видимому, обусловлены выносным потоком взвешенного вещества р. Индигирки, максимальные – морфологическими и гидродинамическими условиями его накопления в пределах выступа островного архипелага и поднятия Лонга. Различия в условиях накопления в плейстоценовых отложениях $C_{орг}$ и $C_{карб}$ выражаются слабой взаимной корреляционной связью ($R^2 = 0.29$). В целом, в районе исследований отчетливо наблюдается закономерное уменьшение в осадках содержаний $C_{орг}$ и $C_{карб}$ в направлении “шельф–пелагиаль”. Данный факт соответствует общей геохимической закономерности распределения углерода в осадках, характерной для акваторий Арктического региона (Данюшевская и др., 1990; Романкевич, Ветров, 2001; Gusev et al., 2009; Астахов и др., 2013; Петрова и др., 2018; Севастьянов и др., 2020).

В этом же направлении возрастает уровень трансформации РОВ, на что указывает снижение индексов нечетности СРІ и ОЕР (табл. 4), а также увеличения относительного содержания литифицированных (термально зрелых) алифатических УВ (Lithis/Σn-alk) (Yamamoto, Polyak, 2009) и отношения Pr/Ph. В целом, характер распределения n-алканов в плейстоценовых осадках свидетельствуют о стабильности условий позднечетвертичного осадконакопления района исследований.

Фациальные обстановки седиментогенеза, в которых формировалось РОВ изученных отложений, могут быть охарактеризованы соотношением стеранов состава $C_{27}–C_{29}$ – маркеров сапропелевого и гумусового ОВ. По данным (Петрова и др., 2018), формирование РОВ осадков шельфа района исследований проходило преимущественно в прибрежных и мелководно-морских условиях (поднятие Лонга), и только РОВ осадков его бровки и верхней части континентального склона приближается к зоне открытого моря (Петрова и др., 2018). Необходимо отметить, что данные осадки

содержат близкое по составу, уровню трансформации и содержанию термально зрелого РОВ гумусо-сапропелевого генезиса ($C_{17}/C_{27} = 0.6–0.8$, $СРІ = 2.3–2.4$, $Litic/Σn-alk = 0.36–0.44$), что может быть обусловлено терригенным стоком продуктов волновой и термоабразии берегов о-вов Генриетты и Жаннетты, и размывом отложений поднятия Лонга течениями.

Распределение концентраций химических элементов и их аномалий в плейстоценовых осадках района исследований определяется наличием геохимического источника их аккумуляции, гидродинамическими, морфологическими и батиметрическими условиями, особенностями процессов седиментогенеза и другими факторами, в т.ч. поступления в верхние части разреза *гидротермальных флюидов*. Источниками их поступления может являться Ломоносово-Менделеевская флексуно-разломная зона (рис. 1), крупные тектонические нарушения и их апофизы, характеризующиеся повышенными показателями теплового потока (Геология..., 2003).

В процессе настоящих исследований в ряду фаций *внешний шельф–бровка шельфа –континентальный склон–котловина* выделено четыре группы химических ассоциаций с максимумами концентраций отдельных макро и микроэлементов и геохимических модулей для каждого батиметрического подразделения. Первая (“кремнеземная” – по названию доминирующего химического макроэлемента) группа фаций обогащена Si, Sg и Ba, три остальные (“кальциевая”, “калий-титановая” и “алюминий-железо-магний-марганцевая”) – другими элементами (табл. 3, рис. 3–5).

Изменение значений *алюмосиликатного модуля* от 0.27–0.30 в пределах внешнего шельфа и его бровки до 0.30–0.31 континентального склона и котловины Подводников указывает на возрастание степени разделения силикатов и алюмосиликатов в процессе постседиментационного преобразования осадков в направлении “шельф–пелагиаль”. С уве-

личением значений модуля наблюдается закономерное возрастание концентраций Mg, Zn, Fe, Ti, Cs, Sc, Ni, V, Mo, влажности осадков, содержания пелитовой фракции и показателей титанового и железомарганцевого модулей. Незначительная изменчивость значений модуля указывает на относительно стабильность процессов седиментогенеза в районе исследований, что подтверждается изменениями значений титанового модуля.

Показатели *титанового модуля* считаются признаком гидротермального влияния на осадки. Значения модуля изменяются от 11 до 12,3, что характерно для терригенных осадков, нежели металлоносных (Страхов, 1976). Данный факт подтверждается результатами корреляционных исследований. Установлено, что с увеличением значений модуля наблюдается возрастание пелитовой фракции, содержания As, Cs, Zn и естественной влажности осадков.

Значения показателей *железомарганцевого модуля* для осадков не превышает 0,03, что характерно для терригенных осадочных отложений (Юдович, Кетрис, 2011). С увеличением значений этого модуля наблюдается возрастание концентраций Mg, Zn и Cd.

Исходя из установленных значений $M_{УВ}$, $K_{вл}$, $\delta^{13}C-CH_4$, C_2H_6 и CO_2 , в изученных плейстоценовых отложениях доминируют *эпигенетические* УВГ, поступающие в осадки в процессе природной диффузии и миграции по зонам тектонических нарушений из подстилающих газоматеринских источников. Относительно низкие значения органической насыщенности и отрицательные температуры отложений на основной площади района исследований, вероятно, предопределяют образование незначительных объемов *сингенетических* УВГ в осадках (Севастьянов и др., 2019; Гресов и др., 2020а) идентифицировать которые из-за процессов их смешивания с миграционными газами достаточно сложно. Исходя из корреляционных соотношений содержания $C_{орг}$ и CO_2 ($R^2 > 0.5$) предполагается, что часть его образовалась непосредственно в осадках, однако значения $\delta^{13}C-CO_2$ (табл. 3) указывают на доминирование в плейстоценовых осадках ее эпигенетической составляющей.

Незначительные объемы сингенетических УВГ могут также объясняться фактом исторического преобразования ОВ плейстоценовых осадков в период 12,1–181 тыс. лет. Эпигенетическую природу УВГ также подтверждают значения изотопного состава $\delta^{13}C-VPDB$ метана и этана (табл. 3), характерные для термогенных УВГ (Whiticar, 1999), а также незакономерная изменчивость концентраций индивидуальных УВ углеводородной фракции (C_1-C_5), представленных в виде: $C_n = C_{n+1}$, $C_n > C_{n+1}$, $C_n < C_{n+1}$ (Галимов,

1973). Данная специфическая особенность характерна для УВГ газонефтяных и нефтяных залежей углефтегазоносных осадочных бассейнов Северо-Востока России (Гресов, 2011, 2012).

В плейстоценовых отложениях континентального склона и верхней террасы котловины Подводников (прогиба Вилькицкого и Ломоносово-Менделеевской флексуры-разломной зоны, Предвосточносибирского осадочного бассейна и Северной структурной террасы установлены миграционные УВГ с газогеохимическими показателями характерными для газонефтяных и нефтяных залежей Ленского, Верхнебуреинского, Анадырского, Сахалинского и др. нефтегазоносных бассейнов Востока России (Алексеев и др., 1981; Гресов, 2011, 2012). При этом, указанные геоструктуры характеризуются также наличием геологических признаков нефтегазоносности, в том числе:

- большим объемом слабодислоцированных осадочных пород и присутствием в составе осадочных толщ, обогащенных $C_{орг}$ (Государственная..., 2015);

- глубиной погружения указанных геоструктур (4–10 км), достаточной для того, чтобы нефтепроизводящие толщи оказались в термобарических условиях главной зоны нефтеобразования;

- присутствием в осадочной толще природных резервуаров, состоящих из пород-коллекторов и перекрывающих их флюидоупоров, а также ловушек УВ, в которых возможно формирование залежей нефти и газа (Хаин и др., 2009; Галимов и др., 2013; Яшин, Ким, 2007; Ким и др., 2016; Казанин и др., 2017; Гресов и др., 2020а; Гресов, Яцук, 2020б, 2020в).

Важно отметить, что плейстоценовые отложения района исследований в пределах распространения предполагаемых газонефтяных и нефтяных залежей (станции Ni, Mo, V, Co, Cu, Sc, Y, Sb, Nb, Th, Cr, Be, Ta, Pb, W, PЗЭ (рис. 3–5), среднее содержание которых в 1,2–3 раза превышают аналогичные их значения на других донных станциях. Данный факт на наш взгляд может быть обусловлен постседиментационными изменениями, связанными с поступлением в осадки термогенных флюидов предполагаемых газонефтяных и нефтяных залежей, что подтверждается аномальной углеводородонасыщенностью отложений >0.05 см³/кг (Яшин, Ким, 2007; Гресов и др., 2017), обусловленной наличием путей миграции УВГ. Результаты работы подтверждают высокий нефтегазоносный потенциал акватории ВСМ и указывают на возможность формирования парагенетических углеводородных и геохимических ассоциаций в донных осадках Северной террасы, Ломоносово-Менделеевской флексуры-разломной зоны и Предвосточносибирского осадочного бассейна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плейстоценовое осадконакопление в пределах внешнего шельфа ВСМ, континентального склона и котловины Подводников связано поступлением терригенного осадочного материала, обогащенного смешанными продуктами абразии пород восточной и западной питающих провинций. Наряду с терригенным стоком, значимая роль в процессе осадконакопления, по-видимому, принадлежит процессам субаквального размыва и переотложения продуктов денудации коренных пород геологических образований о-вов Генриетты, Жаннетты и отложений поднятия Де-Лонга.

Гранулометрический состав и водно-физические свойства плейстоценовых донных осадков определяется подледно-морскими условиями седиментации, морфологией дна, глубиной моря, геохимическими особенностями терригенных источников и гидродинамическим режимом района исследований.

Плейстоценовые донные отложения представлены бескарбонатными и слабокарбонатными осадками. Линейно-площадной характер трансформации $S_{\text{карб}}$ вдоль бровки шельфа обусловлен волновой и термоабразией пород побережья о-вов Де-Лонга, а также морфологическими и гидродинамическими особенностями района исследований в области соединения и смешивания тихоокеанских и атлантических вод.

Повышенные содержания $S_{\text{орг}}$ в осадках южной части района исследований обусловлены выносным потоком взвешенного вещества из палеодолины р. Индигирки, максимальные — в северной — морфологическими и гидродинамическими особенностями его накопления в пределах поднятия Де-Лонга в области доминирования атлантических вод. Минимальные значения $S_{\text{орг}}$ установлены в осадках котловины Подводников. Установленная закономерность уменьшения в осадках содержаний $S_{\text{орг}}$ и $S_{\text{карб}}$ в направлении “шельф—пелагиаль” соответствует общей геохимической закономерности распределения углерода в осадках, характерной для акваторий Арктического региона.

Молекулярный состав ОВ свидетельствует о значительном уровне трансформации РОВ осадков, стабильности условий плейстоценового осадконакопления и смешанном составе сапропелево-гумусового и гумусо-сапропелевого РОВ, сформированного в прибрежных, мелководно-морских и морских условиях.

Исследование химического состава плейстоценовых отложений позволило выделить четыре основные группы геохимических ассоциаций с максимальными концентрациями элементов в определенных батиметрических структурах, связанных прямыми и обратными связями с гранулометрическим составом, влажностью и плотно-

стью осадков, глубинами моря и опробования и другими факторами, в т. ч. предполагаемого поступления в верхние части разреза гидротермальных флюидов.

В составе УВГ плейстоценовых отложений доминируют эпигенетические газы, поступающие в процессе природной диффузии и миграции по зонам тектонических нарушений из подстилающих газоматеринских источников. Относительно низкие значения органической насыщенности на основной площади района исследований, а также процессы исторического преобразования ОВ в период 12.5–181 тыс. лет предопределяют образование незначительных объемов сингенетических УВГ в осадках.

Формирование состава эпигенетических УВГ подчиняется правилам аддитивности, т.е. последовательного накопления эпигенетических УВГ с доминированием газовой фазы и газогеохимических показателей более газонасыщенного газоматеринского источника.

В донных отложениях Предвосточносибирского осадочного бассейна, Ломоносово-Менделеевской флексуры-разломной зоны установлены УВГ с газогеохимическими показателями газонефтяных и нефтяных залежей, характерными для аналогичных залежей Ленского, Верхнебуреинского, Анадырского, Сахалинского нефтегазовых бассейнов.

Полученные результаты подтверждают высокую нефтегазоперспективность района исследований и представительность прямого метода газогеохимического поиска залежей нефти и газа. Район исследований нуждается в проведении дополнительных комплексных нефтегазопроисковых исследований.

Авторы выражают благодарность А.С. Астахову, Р.Б. Шакирову и Ю.П. Василенко за поддержку в проведении экспедиционных морских исследований, В.В. Калининскому за помощь в отборе проб донных осадков, а также А.В. Алаторцеву за подготовку проб для проведения химических анализов осадков.

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. (1981) Изотопно-геохимическая характеристика нефтей и газов восточной части Сибирской платформы. *Органическая геохимия нефтей, газов и органического вещества докембрия*. (Под ред. Алексеева А.А.). М.: Наука, 164-175.

- Астахов А.С., Гусев Е.А., Колесник А.Н., Шакиров Р.Б. (2013) Условия накопления органического вещества и металлов в донных осадках Чукотского моря. *Геология и геофизика*. **54**(9), 1348-1365.
- Атлас Арктики (1985) (Под ред. Трешникова А.Ф.). М.: Главное управление геодезии и картографии, 204 с.
- Велев В.Х. (1981) *Молекулярная масса углеводородной фракции и весовое распределение компонентов C₁-C₅ в природных газах разных генетических типов. Органическая геохимия нефтей, газов и органического вещества докембрия.* (Под ред. Алексеева А.А.). М.: Наука, 22-28.
- Ветров А.А., Семилетов И.П., Дударев О.В., Пересыпкин В.И., Чаркин А.Н. (2008) Исследование состава и генезиса органического вещества донных осадков Восточно-Сибирского моря. *Геохимия*. (2), 183-195.
- Vetrov A.A., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Peresyypkin V.I., Charkin A.N. (2008) Composition and genesis of the organic matter in the bottom sediments of the East Siberian Sea. *Geochem. Int.* **46**(2), 156-167.
- Галимов Э.М. (1973) *Изотопы углерода в нефтегазовой геологии*. М.: Недра, 384 с.
- Галимов Э.М., Кодина Л.А. (1982) *Исследование органического вещества и газов в донных толщах дна Мирового океана*. М.: Наука, 228 с.
- Галимов Э.М., Немченко-Ровенская А.С., Немченко Т.Н., Коробеник Г.С. (2013) Геолого-геохимические предпосылки нефтегазоносности Дальневосточного сектора российской Арктики. *Недропользование 21 век*. **41**(4), 12-14.
- Геология и полезные ископаемые России. Арктические моря (2003) (Под ред. Алексеева М.Н.). СПб.: ВСЕГЕИ, 468 с.
- ГОСТ 31371.3-2008 (2009) Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности. М.: Стандартинформ, 16 с.
- Государственная геологическая карта. Серия Лаптево-Сибироморская, Океанская (2015). Масштаб 1 : 1000000. Лист Т-57-60 – остров Генриетты. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 84 с.
- Государственная геологическая карта России и прилегающих акваторий (2016). Масштаб 1 : 2500000. СПб.: ВСЕГЕИ.
- Гресов А.И. (2011) Геохимическая классификация углеводородных газов углеводородных бассейнов Востока России. *Тихоокеанская геология*. **30**(2), 87-103.
- Гресов А.И. (2012) Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока и перспективы её промышленного освоения. Углеметановые бассейны Республики Саха (Якутия) и Северо-Востока России. Владивосток: Дальнаука, 468 с.
- Гресов А.И., Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П., Яцук А.В. (2016) Изотопно-геохимические показатели углеводородных газов донных осадков шельфа Восточно-Сибирского моря. *ДАН*. **469**(6), 711-713.
- Гресов А.И., Сергиенко В.И., Яцук А.В., Зарубина Н.В., Калинин В.В. (2020а) Газогеохимические показатели донных отложений северной части Восточно-Сибирского моря и котловины Подводников Северно-Ледовитого океана. *ДАН*. **492**(1), 113-117.
- Гресов А.И., Яцук А.В. (2020б) Геохимия и генезис углеводородных газов Чаунской впадины и Айонского осадочного бассейна Восточно-Сибирского моря. *Тихоокеанская геология*. **39**(1), 92-101.
- Гресов А.И., Яцук А.В. (2020в) Газогеохимические признаки нефтегазоносности юго-восточной части Восточно-Сибирского моря. *Геология нефти и газа*. (4), 83-95.
- Гусев Е.А., Зинченко А.Г., Бондаренко С.А., Аникина Н.Ю., Деревянко Л.Г., Максимов Ф.Е., Кузнецов В.Ю., Левченко С.Б., Жеребцов И.Е., Попов В.В. (2012) *Новые данные о рельефе и четвертичных отложениях внешнего шельфа Восточно-Сибирского моря. Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии*. (4), М.: ГЕОС, 58-68.
- Гусев Е.А., Рекант П.В., Большианов Д.Ю., Лукашенко Р.В., Попко А.О. (2013) Псевдогляциальные структуры подводных гор поднятия Менделеева (Северный Ледовитый океан) и континентальной окраины Восточно-Сибирского моря. *Проблемы Арктики и Антарктики*. **98**(4), 43-55.
- Данюшевская А.И., Петрова В.И., Яшин Д.С., Батова Г.И., Артемьев В.Е. (1990) *Органическое вещество донных осадков полярных зон Мирового океана*. Л.: Недра, 280 с.
- Дегтяренко Ю.П., Пуминов А.П., Благовещенский М.Г. (1982) *Береговые линии восточно-арктических морей в позднем плейстоцене и голоцене. Колебания уровня морей и океанов за 15 000 лет*. М.: Наука, 179-185.
- Казанин Г.С., Барабанова Ю.Б., Кириллова-Покровская Т.А., Черников С.Ф., Павлов С.П., Иванов Г.И. (2017) Континентальная окраина Восточно-Сибирского моря: геологическое строение и перспективы нефтегазоносности. *Разведка и охрана недр*. (10), 51-55.
- Ким Б.И., Евдокимова Н.К., Харитоновна Л.Я. (2016) Структура, нефтегазовый потенциал и нефтегеологическое районирование восточно-арктического шельфа России. *Геология нефти и газа*. (3), 2-15.
- Кошелева В.А., Яшин Д.А. (1999) Донные осадки арктических морей России. СПб.: ВНИИОкеангеология, 286 с.
- Павлидис Ю.А., Щербаков Ф.А. (2000) Современные донные осадки арктических морей Евразии. *Океанология*. **40**(1), 137-147.
- Петрова В.И., Батова Г.И., Куршева А.В., Литвиненко И.В., Моргунова И.П. (2018) Углеводородные молекулярные маркеры как индикаторы особенностей позднейкайнозойского осадконакопления на амеразийской континентальной окраине Северного Ледовитого океана. *70 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане*. (Под ред. Каминского В.Д.). СПб.: ВНИИ-Океангеология, 315-326.
- Романкевич Е.А., Данюшевская А.И., Беляева А.Н., Русанов В.Н. (1982) *Биогеохимия органического вещества арктических морей*. М.: Наука, 239 с.
- Романкевич Е.А., Ветров А.А. (2001) *Цикл углерода в арктических морях России*. М.: Наука, 302 с.
- Руководство по определению и прогнозу газоносности вмещающих пород при геологоразведочных работах (1985). Ростов-на-Дону: ВНИИГРИУголь, 96 с.
- Севастьянов В.С., Федулов В.С., Федулова В.Ю., Кузнецова О.В., Душенко Н.В., Наймушин С.Г., Стеников А.В., Кривенко А.П. (2019) Изотопно-геохимические исследования органического вещества морских

- осадков от дельты реки Индигирка до границы постоянных льдов в Восточно-Сибирском море. *Геохимия*. **64**(5), 451-459.
- Sevastyanov V.S., Fedulov V.S., Fedulova V.Yu., Kuznetsova O.V., Dushenko N.V., Naimushin S.G., Stennikov A.V., Krivenko A.P. (2019) Isotopic and Geochemical Study of Organic Matter in Marine Sediments from the Indigirka Delta to the Ice Shelf Border of the East-Siberian Sea. *Geochem. Int.* **57**(5), 489-498
- Севастьянов В.С., Кузнецова О.В., Федулов В.С., Федулова В.Ю., Душенко Н.В., Наймушин С.Г., Бычкова Я.В., Кривенко А.П. (2020) Накопление органического вещества, тяжелых металлов и редкоземельных элементов в морской осадке на различном расстоянии от дельты реки Индигирка. *Геохимия*. **65**(12), 1167-1175.
- Sevastyanov V.S., Kuznetsova O.V., Fedulov V.S., Fedulova V.Yu., Dushenko N.V., Naimushin S.G., Bychkova Ya.V., Krivenko A.P. (2020) Accumulation of Organic Matter, Heavy Metals, and Rare-Earth Elements in Marine Sediment at Different Distance from the Indigirka River Delta. *Geochem. Int.* **58**(12), 1313-1320.
- Старобинец И.С., Петухов А.В., Зубайраев С.Л. и др. (1993) *Основы теории геохимических полей углеводородных скоплений*. М.: Недра, 332 с.
- Страхов Н.М. (1976) *Проблемы геохимии современного литогенеза*. М.: Наука, 289 с.
- Хаин В.Е., Полякова И.Д., Филатова Н.И. (2009) Тектоника и нефтегазоносность восточной Арктики. *Геология и геофизика*. **4**(50), 443-460.
- Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И. (2013) Газогеохимические аномалии в осадках Восточно-Сибирского моря. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. **21**(1), 98-110.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2011) Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 742 с.
- Яшин Д.С., Ким Б.И. (2007) Геохимические признаки нефтегазоносности Восточно-Арктического шельфа России. *Геология нефти и газа*. (4), 24-35.
- Abrams M.A. (2005) Significance of hydrocarbon seepage to petroleum generation and entrapment. *Mar. Pet. Geol.* (22), 457-477.
- Abrams M.A. (2017) Evaluation of Near-Surface Gases in Marine Sediments to Assess Subsurface Petroleum Gas Generation and Entrapment. *Geosciences*. (7), 29-35.
- Astakhov A.S., Sattarova V.V, Shi Xuefa, Hu Limin, Aksentov K.I., Alatorsev A.V., Kolesnik O.N., Mariash A.A. (2019) Distribution and sources of rare earth elements in sediments of the Chukchi and East Siberian Seas. *Polar Sci.* (20), 148-159.
- Gusev E.A., Andreeva L.A., Anikina N.Y., Bondarenko S.A., Derevyanko L.G., Iosifidi A.G., Klyuvitkina T.S., Litvinenko I.V., Petrova V.I., Polyakova E.I., Popov V.V., Stepanova A.Y. (2009) Stratigraphy of Late Cenozoic sediments of the western Chukchi Sea: new results from shallow drilling and seismicreflection profiling. *Glob. Planet. Change*. (68), 115-131.
- 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., and Jakobsson M. (2017) The De Long Trough: a newly discovered glacial trough on the East Siberian continental margin. *Clim. Past*. (13), 1269-1284.
- Sakshaug E. (2004) *Primary and secondary productivity in the Arctic Seas: The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean* (Eds. R. Stein and R.W. Macdonald). Berlin: Springer, 57-81.
- Stein R., Matthiessen J., Niessen F., Krylov A., Seung-il Nam, Bazhenova E. (2009) Towards a better (litho-) stratigraphy and reconstruction of Quaternary paleoenvironment in the Amerasian Basin (Arctic Ocean). *Polarforschung*. (79)2, 97-121.
- Yamamoto M., Polyak L. (2009) Changes in terrestrial organic matter input to the Mendeleev Ridge, Arctic Ocean during the Late Quaternary. *Glob. Planet. Change*. (68), 30-37.
- Velivetskaya T.A., Ignatev A., Kiyashko S. (2015) Universal method for preparation of liquid, solid and gaseous samples for determining the isotopic composition of carbon. In: Sevastyanov V.S., ed. *Isotope Ratio Mass Spectrometry of Light Gas-Forming Elements*. UK: CRC Press, 119-134.
- Whiticar Michael J. (1999) Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chem. Geol.* (161), 291-314.