

УДК 504.422

ИСТОЧНИКИ МАТЕРИАЛА ПОВЕРХНОСТНЫХ ДОННЫХ ОСАДКОВ ВОСТОКА ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ (РЕКОНСТРУКЦИЯ ПО ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ)

© 2021 г. А. В. Маслов*

*Геологический институт РАН, Москва, Россия***e-mail: amas2004@mail.ru*

Поступила в редакцию 08.12.2020 г.

После доработки 29.12.2020 г.

Принята к публикации 14.02.2021 г.

На основе аналитических материалов, полученных в 2008 г. в экспедиции на НИС “Академик М.А. Лаврентьев” по региональному газогеохимическому профилю, протягивавшемуся от мыса Биллингса на 550 км в сторону подводного хр. Менделеева, выполнена реконструкция особенностей формирования состава поверхностных донных осадков (пелитовых алевритов и алевритовых пелитов) в восточной части Восточно-Сибирского моря. Установлено, что исследованная совокупность проб по величинам Cr/Th , Th/Co , La/Sc , а также Eu/Eu^* и $(Eu/Sm)_N$ состоит из двух групп. В состав первой группы входят пробы, отобранные на станциях 70...350 газогеохимического профиля, в состав второй группы – пробы, отобранные на станциях 370...560. На диаграммах $(La/Yb)_N$ – Eu/Eu^* и $(La/Yb)_N$ – $(Eu/Sm)_N$ точки проб сосредоточены в зоне перекрытия областей состава алеврито-пелитовых осадков устьевых частей крупных рек и рек, питающихся преимущественно продуктами размыва осадочных пород. Распределение точек донных осадков на данных диаграммах, так же как и на диаграмме $(La/Yb)_N$ – Th , отличается от распределения точек неопротерозойских амфиболитов, гранитоидов и риолитов о. Врангеля, поэтому последние, скорее всего, не могли являться источниками тонкой алюмосиликокластики. Пробы первой группы по величинам Eu/Eu^* и $(Eu/Sm)_N$ и ряду других параметров достаточно близки к поверхностным донным осадкам Восточно-Сибирского моря. Напротив, пробы второй группы ближе к поверхностным донным осадкам Чукотского моря. По всей видимости, поверхностные донные осадки к северо-западу от о. Врангеля сформированы под влиянием течений, выносящих тонкую алюмосиликокластику из Чукотского моря. К западу от него состав осадков контролируется в основном материалом, поступающим из западных и центральных районов Восточно-Сибирского моря.

Ключевые слова: Восточно-Сибирское море, поверхностные донные осадки, геохимия, источники тонкой алюмосиликокластики

DOI: 10.31857/S0030157421040109

ВВЕДЕНИЕ

История изучения поверхностных донных осадков морей Российской Арктики похожа на историю всех подобных работ – от первичного сбора разрозненных фактов, их оценки и обобщения путь этот неминуемо ведет к исследованию ассоциаций обломочных и глинистых минералов, а затем изотопно-геохимическим работам. И хотя детальность всех перечисленных работ еще далека от желаемой, имеющиеся факты уже позволяют сделать весьма интересные выводы об особенностях формирования и источниках материала, слагающего донные отложения обширных шельфовых морей Северного Ледовитого океана. Более того, будучи иногда сугубо целенаправленными, эти работы дают в ряде случаев значительно больше фактического материала, чем требуется

для достижения декларируемых в их рамках целей, что позволяет впоследствии вернуться к его осмыслению под новым углом зрения. В настоящей публикации мы покажем это на примере регионального газогеохимического профиля, пройденного в восточной части Восточно-Сибирского моря западнее о. Врангеля [37–39].

Площадь акватории Восточно-Сибирского моря составляет немногим менее 900 000 км², почти половина его характеризуется глубинами <30 м [36]. Главными источниками терригенного материала являются продукты разрушения ледового комплекса побережья и речной аллювий [36], но соотношение между ними – до сих пор предмет дискуссий. В целом для Восточно-Сибирского моря характерны три литодинамические обстановки: 1) аседиментогенная (типичные осадки –

средне- и мелкозернистые пески подводных банок и зоны волновой сепарации на подводном береговом склоне); 2) стабильной аккумуляции (доминируют пелиты, пелиты алевроитовые, миктиты алевроитовые и пелитовые, распространенные на глубинах >30 м). Именно такая обстановка характерна для рассматриваемого нами в данной работе района к западу от о. Врангеля; 3) неустойчивой аккумуляции (характерны алевроитовые и пелитовые пески, песчаные и пелитовые алевроиты, алевроитовые пелиты, пелиты и другие типы осадков, залегающие на глубинах <30 м). Для восточной части моря характерно поле дисперсных пелитов, приуроченное к предполагаемому здесь циклоническому квазистационарному круговороту. Алевроито-пелитовые осадки западной части моря отражают, по всей видимости, существование антициклонических течений [36]. Вдоль побережья Восточно-Сибирского моря проходит Сибирское прибрежное течение, переносящее воды с запада на восток. У мыса Биллингса часть из них поворачивает на север и северо-запад, выносится к северной границе моря и включается в течение, направленное на запад. Через пролив Лонга часть вод из Восточно-Сибирского моря выносится в Чукотское море. Ветра делают Сибирское прибрежное течение достаточно переменчивым; ветровые течения нередко бывают сильнее постоянных [41].

По представлениям [15, 16, 40 и др.], голоценовые осадки морей Российской Арктики в прибрежной части шельфа формируются под заметным влиянием крупных аллювиальных систем, а на севере акватории – ледово-морских обстановок. Последнее особенно заметно в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском. Накопление осадков на шельфе Восточно-Сибирского моря контролируется двумя крупными реками – Индигиркой и Колымой, а на востоке – также и прибрежными течениями [67]. Для моря в целом типична иллит-хлорит-каолинит-смектитовая ассоциация глинистых минералов (количество иллита может достигать 70%, количество смектита <10%) [12, 14, 67 и ссылки в этих работах]. Источниками смектита считаются р. Юкон, северные районы Берингова моря [59] и, возможно, р. Колвилл, впадающая в море Бофорта; в осадках ее дельты содержание смектита достигает 10–30% [60]. Транзит тихоокеанских вод в Северный Ледовитый океан через Берингов пролив подтверждается также наличием южно-бореальных, субтропических и тропических видов диатомей в голоценовых отложениях Чукотского моря [6].

На формирование позднейкайнозойских отложений шельфа Восточной Арктики в результате деятельности рек указывают и авторы работ [7, 9, 10, 31 и др.]. Продвижение крупных сибирских рек на север было особенно заметным во время последнего ледникового максимума и мессин-

ского кризиса миоцена [7]. Существенную роль в поверхностной континентальной осадочной толще играют и образования ледового комплекса. По данным [9], “оголенный” сарганской/вюрмской регрессией (20–18 тыс. лет назад) шельф Восточно-Сибирского моря пересекали многочисленные реки. Примерно 5–6 тыс. лет назад он был затоплен, и береговая зона приобрела современные очертания.

Исследования в рамках 69-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” (сентябрь 2017 г.) показали, что верхние 0–20 см донных осадков Восточно-Сибирского моря представлены пелитовыми, алевроито-пелитовыми и мелкоалевритовыми вязко-текучими и вязкими илами с содержанием пелитового (<0.01 мм) компонента от 40 до 80% [30]. Глинистый комплекс тонкопелитовой фракции представлен иллитом, смектитом, хлоритом, каолинитом и смешанослойными образованиями при преобладании (80–85%) хлорит-иллитовой ассоциации. Существенная однородность его состава обусловлена стабильным поступлением терригенного материала с речным стоком и береговой термоабразией на протяжении всего голоцена. Вклад материала ледового разноса в формирование поверхностных донных осадков Восточно-Сибирского моря представляется авторам публикации [30] незначительным.

Работы по региональному газогеохимическому профилю, протягивавшемуся западнее о. Врангеля от мыса Биллингса на 550 км в сторону хр. Менделеева (рис. 1) [37–39], позволили установить, что содержание органического углерода ($C_{орг}$) в поверхностных осадках коррелирует с количеством в них пелитовой фракции. Высокую степень корреляции с $C_{орг}$ в осадках имеют железо и тяжелые металлы. Выяснено, что содержание V, Sc и Zn по профилю в 1.5–2 раза выше среднего содержания этих элементов в осадочных породах континентов, минимальные значения приходятся на станции, где в осадке наименьшие количества пелита и $C_{орг}$. Для Cr и Co коэффициенты концентрирования <1. Содержание Pb в осадках сопоставимо со средним содержанием этого элемента в осадочных породах континентов, тогда как содержание U, Th и Hf ниже. Между содержанием пелитовых фракций в осадке, количеством в нем $C_{орг}$ и Fe и суммой редкоземельных элементов (РЗЭ) наблюдается положительная корреляция. Показано, что распределение большинства редких и рассеянных элементов в поверхностных осадках профиля контролируется, в том числе и аномалиями метана, создающими в них специфические физико-химические условия [39].

В публикации [1] распределение РЗЭ проанализировано в донных осадках всего восточно-арктического шельфа России. Авторами работы [1] установлено обогащение РЗЭ отложений моря

Лаптевых и западной части Восточно-Сибирского моря, что связано с влиянием речных выносов Лены, водосбор которой в существенной степени сложен древними кристаллическими и магматическими породами с высоким содержанием легких лантаноидов. В донных осадках Чукотского моря, в которое через Берингов пролив поступает материал со специфическим составом РЗЭ, сумма РЗЭ, напротив, минимальна. Распределение РЗЭ в Восточно-Сибирском море контролируется гранулометрическим составом осадков; связь между суммой РЗЭ и содержанием $C_{орг}$ не выражена. Вместе с рядом других фактов это дает основание предполагать, что преобладающая часть РЗЭ поступает в составе материала терригенного сноса (размыв ледового комплекса и твердый сток рек). Корреляция содержаний лантаноидов с крупными фракциями осадков указывает, по мнению авторов работы [1], на привнос РЗЭ в осадки относительно глубоководных районов Восточно-Сибирского моря с материалом ледового разноса.

МАТЕРИАЛ

Для расшифровки особенностей формирования состава поверхностных донных осадков в восточной части Восточно-Сибирского моря использованы аналитические материалы (данные о содержании пелитовой фракции, $C_{орг}$, редких и рассеянных элементов в пелитовых алевролитах и алевроитовых пелитах¹, табл. 1), полученные в 2008 г. в экспедиции сотрудников ТОИ ДВО РАН и ФГУНПП “Севморгео” на НИС “Академик М.А. Лаврентьев” [37–39]. Гранулометрический анализ осадков выполнен лазерно-дисперсионным методом на установке “Microtrac-100” в Тюменском отделении “СургутНИПИнефть” [39]. Определение элементного состава донных отложений проведено в ДВГИ ДВО РАН методами ICP-OES и ICP-MS [38]. Перед указанными исследованиями пробы не подвергались какой-либо предварительной обработке. Содержание $C_{орг}$ определено на анализаторе TOC-VCPN с приставкой для сжигания твердых проб SSV-5000A “SHIMADZU” в ТОИ ДВО РАН [39]. С учетом того, что пробы донных осадков были отобраны с использованием оборудования, не сохраняющего ненарушенный поверхностный слой и наилот, можно предполагать полученные авторами публикаций [37–39] содержания $C_{орг}$ несколько заниженными, однако они достаточно хорошо согласуются с результатами исследований, опубликованными в работах [3, 5, 30, 32, 33, 63], и, по всей видимости, могут рассматриваться как адекватно отражающие реальную ситуацию. Основываясь на данной в работе [30] оценке возможной средней скорости осадконакопления в Восточно-

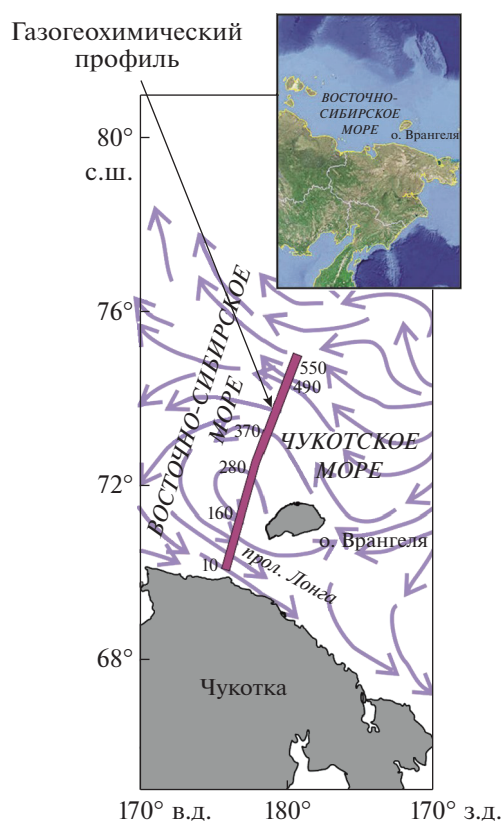


Рис. 1. Положение газогеохимического профиля, геохимические особенности проб поверхностных донных осадков которого обсуждаются в настоящей работе. Схема циркуляции вод на поверхности показана в соответствии с [2].

Сибирском море ~ 2 мм/год, можно думать, что интервал донных осадков мощностью 20 см формируется за период времени около 100 лет, т.е. не может фиксировать какие-то принципиальные изменения систем течений, обстановок седиментации и других параметров осадконакопления как в названном бассейне, так и в Чукотском море.

В ходе экспедиции по региональному газогеохимическому профилю длиной 550 км (от мыса Биллингса, $69^{\circ}58.07'$ с.ш., $175^{\circ}48.38'$ в.д., к подводному хр. Менделеева, $74^{\circ}42.63'$ с.ш., $179^{\circ}36.41'$ в.д.) на 56 станциях, располагавшихся через 10 км, ее участниками был выполнен отбор кернов поверхностных донных отложений и изучены особенности распределения концентраций углеводородных газов в их толще. Отбор проб проводился ударной прямооточной трубкой (длина 4 м, внутренний диаметр 60 мм) [37, 38].

Исходя из региональной ситуации, можно также предполагать, что определенный вклад в формирование поверхностных донных осадков вдоль регионального газогеохимического профиля, пройденного западнее о. Врангеля, могут оказывать и слагающие его образования. В геологической структуре

¹ Классификация осадков в соответствии с [37 и ссылки там].

Таблица 1. Содержание пелитовой фракции, $C_{\text{орг}}$, некоторых редких и рассеянных элементов (г/т) и значения их индикаторных отношений в пробах пелитовых алевроитов и алевроитовых пелитов, отобранных вдоль газогеохимического профиля в восточной части Восточно-Сибирского моря

Компоненты, индикаторные отношения	Номер станции										
	70	90	100	110	120	130	160	230	280	290	300
	Глубина моря, м										
	43	39	39	38	37	37	31	33	45	45	46
	Пелит, об. %										
	46.97	48.03	46.67	43.96	46.18	49.59	41.27	39.52	59.11	56.08	50.18
	$C_{\text{орг}}$, мас. %										
	1.72	1.58	1.39	1.74	1.65	1.46	1.27	1.44	2.15	2.08	2.06
Mn	300	300	300	300	300	300	200	300	300	300	300
Sc	6.20	12.60	12.00	11.70	12.10	11.70	10.10	10.60	12.70	13.20	12.50
V	125.90	146.60	136.30	142.70	145.00	140.50	121.20	130.10	179.80	183.90	173.50
Cr	68.00	73.00	68.00	68.00	72.00	82.00	59.00	59.00	78.00	83.00	76.00
Co	8.00	10.00	9.00	9.00	9.00	11.00	8.00	8.00	9.00	10.00	9.00
Ni	25.94	28.05	28.50	27.82	27.96	27.87	30.96	27.45	29.08	29.98	28.93
Cu	13.50	16.71	16.54	15.94	16.89	15.43	13.34	14.64	20.07	18.48	18.42
Y	13.45	17.17	16.69	15.57	16.21	15.99	15.33	16.20	15.60	16.27	16.13
La	22.76	24.97	22.80	23.04	24.84	23.27	24.05	23.10	20.57	21.65	22.67
Sm	4.45	4.99	4.74	4.61	5.03	4.70	4.75	4.67	4.34	4.49	4.63
Eu	0.89	0.98	0.95	0.89	0.94	0.94	0.94	0.91	0.86	0.94	0.92
Gd	4.00	4.52	4.15	4.08	4.21	4.09	4.09	4.07	3.74	4.10	3.97
Yb	1.59	1.75	1.78	1.64	1.76	1.70	1.61	1.73	1.67	1.61	1.75
Hf	1.71	2.40	2.22	2.12	2.28	2.37	2.23	2.26	2.02	2.16	2.24
Pb	12.72	18.73	15.25	14.51	14.74	14.54	12.86	13.37	16.47	16.23	16.70
Th	7.81	8.75	8.18	8.06	8.42	8.34	8.06	7.64	7.99	8.38	8.22
U	2.03	2.78	2.44	2.64	3.33	2.06	1.81	1.68	2.00	1.95	1.94
La/Sc	3.71	1.98	1.92	1.97	2.07	1.45	2.38	2.17	1.65	1.67	1.84
Th/Sc	1.26	0.70	0.68	0.69	0.69	0.71	0.80	0.72	0.63	0.64	0.66
Th/Co	0.98	0.88	0.91	0.90	0.93	0.75	1.01	0.95	0.89	0.84	0.91
Cr/Th	8.72	8.30	8.29	8.40	8.57	9.88	7.28	7.76	9.75	9.88	9.27
Th/U	3.85	3.15	3.35	3.05	2.53	4.05	4.45	4.55	4.00	4.30	4.24
Eu/Eu*	0.64	0.63	0.65	0.63	0.62	0.66	0.65	0.64	0.65	0.67	0.66
(La/Yb) _N	9.67	9.64	8.66	9.49	9.54	9.25	10.09	9.02	8.32	9.09	8.75
(Eu/Sm) _N	0.53	0.52	0.53	0.51	0.5	0.53	0.53	0.52	0.53	0.56	0.53

Таблица 1. Окончание

Компоненты, индикаторные отношения	Номер станции									
	330	350	370	380	410	440	470	500	520	560
	Глубина моря, м									
	61	54	55	55	56	63	70	99	127	200
	Пелит, об. %									
	45.93	46.47	48.72	72.51	39.51	45.34	39.29	45.69	47.76	55.27
	C _{орг} , мас. %									
	2.13	1.92	1.94	1.48	1.47	1.79	1.76	2.27	2.12	1.77
Mn	400	300	300	600	300	300	300	2700	7200	3200
Sc	12.40	11.90	12.90	15.00	11.20	12.30	12.20	14.04	13.50	15.50
V	189.00	175.30	177.20	157.80	159.80	173.30	165.20	215.80	214.20	276.80
Cr	75.00	73.00	76.00	92.00	66.00	73.00	81.00	86.00	80.00	82.00
Co	11.00	10.00	11.00	16.00	10.00	11.00	12.00	24.00	26.00	34.00
Ni	29.23	29.39	39.88	45.96	38.48	35.41	46.60	45.02	49.17	67.11
Cu	18.52	17.89	20.51		18.71	17.50	16.77	21.68	22.57	32.45
Y	16.05	15.64	16.21	18.36	15.24	15.44	16.16	15.91	15.28	16.46
La	20.84	21.59	22.49	26.11	23.36	23.88	24.21	22.93	22.32	23.46
Sm	4.44	4.64	4.60	5.40	4.38	4.68	4.83	4.75	4.48	4.90
Eu	0.85	0.91	1.08	1.21	1.03	1.07	1.09	1.09	1.03	1.13
Gd	3.96	4.09	4.42	4.93	4.22	4.46	4.46	4.39	4.32	4.64
Yb	1.69	1.65	1.86	2.03	1.62	1.81	1.81	1.79	1.68	2.02
Hf	2.14	1.93	2.08	2.30	1.88	2.12	2.08	2.15	2.00	2.23
Pb	17.57	16.80	19.12	19.91	15.42	16.57	15.34	18.81	18.45	19.78
Th	7.78	7.73	8.09	8.86	7.47	7.99	8.06	8.37	8.19	8.96
U	2.02	2.09	2.21	2.83	2.53	2.56	2.51	2.32	2.11	3.43
La/Sc	1.69	1.85	1.71	1.40	2.05	1.95	1.48	0.71	0.89	1.48
Th/Sc	0.63	0.65	0.63	0.59	0.67	0.65	0.66	0.60	0.61	0.58
Th/Co	0.71	0.77	0.74	0.56	0.75	0.73	0.68	0.35	0.32	0.26
Cr/Th	9.62	9.48	9.38	10.34	8.80	9.13	10.00	10.24	9.76	9.11
Th/U	3.85	3.70	3.66	3.13	2.95	3.12	3.21	3.61	3.88	2.61
Eu/Eu*	0.62	0.64	0.73	0.72	0.73	0.72	0.72	0.73	0.72	0.72
(La/Yb) _N	8.33	8.84	8.17	8.69	9.74	8.92	9.04	8.66	8.98	7.85
(Eu/Sm) _N	0.51	0.52	0.62	0.59	0.62	0.61	0.6	0.61	0.61	0.61

В данной таблице приведены сведения о содержании в поверхностных донных осадках газогеохимического профиля только тех редких и рассеянных элементов, что использованы при построении рассматриваемых нами диаграмм.

о. Врангеля выделяются метаморфический фундамент (врангелевский комплекс) и осадочный чехол, объединяющий отложения верхнего силура—среднего девона, верхнего девона—нижнего карбона, собственно карбона, перми и верхнего триаса [4, 13, 34, 35]. В составе врангелевского комплекса присутствуют тела гранито-гнейсов, мусковитовых и двуслюдяных гранитов (в том числе рассланцованных и милонитизированных), гранит-порфиоров и габбро-амфиболитов. Сведения об их геохимических особенностях приведены в публикациях [34, 52] и использованы в настоящей работе.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При работе с указанным материалом мы применили геохимические методы реконструкции состава пород-источников сноса, обычно используемые при исследовании осадочных пород разного возраста [23] и с успехом опробованные нами ранее на примере поверхностных донных осадков Белого, Каспийского и Баренцева морей [18–22, 24, 25, 27, 28]. Это анализ положения фигуративных точек состава поверхностных донных осадков на различных парных диаграммах (Cr/Th–Th/Sc, La/Sc–Th/Co, Sc–Th/Sc и др.), рассмотрение нормированных к тем или иным референтным геохимическим объектам (хондрит, PAAS, NASC и др.) спектров распределения РЗЭ, а также исследование вариаций значений различных индикаторных отношений редких и рассеянных элементов (Th/Cr, La/Sc и др.).

При этом мы считаем, что: 1) унаследованные от материнских пород содержания и отношения редких и рассеянных элементов в глинистых породах в большинстве случаев существенно не меняются в процессах литогенеза и регионального метаморфизма; 2) определенные типы магматических пород характеризуются определенными ассоциациями и соотношениями редких и рассеянных элементов (так, для кислых магматических образований характерны на один-два порядка более высокие, нежели для пород основного состава, значения отношений Th/Sc, La/Sc, La/Co, Th/Co, Th/Cr и V/Ni, и, наоборот, основные магматические породы имеют на один-два порядка более высокие значения Cr/Zr, Cr/V и ряда других индикаторных отношений); 3) состав пород источников сноса и тип размывавшейся верхней континентальной коры в определенной степени контролируют и разнообразие нормированных по хондриту спектров распределения РЗЭ в осадочных породах (например, магматические породы основного состава характеризуются низкими отношениями легких лантаноидов к тяжелым ($ЛРЗЭ/ТРЗЭ < 4–5$) и не имеют выраженной отрицательной Eu аномалии, тогда как кислым породам свойственны высокие отношения $ЛРЗЭ/$

$ТРЗЭ (>8)$ и отчетливая отрицательная Eu аномалия). Эти представления, впервые высказанные в публикациях середины 1980-х гг. [11, 17, 29, 46–49, 51, 53–56, 61–65 и др.], актуальны и в настоящее время.

Для оценки локальных окислительно-восстановительных обстановок в бассейне седиментации использовано отношение Th/U [44, 69 и ссылки в этих работах]. Торий имеет только одну валентность (4+), и его концентрация в осадках не зависит от редокс-параметров среды. Уран принадлежит к категории элементов, чувствительных к вариациям окислительно-восстановительных характеристик водной колонны или поровых флюидов осадка, и, обладая в восстановительных обстановках валентностью 4+, выводится из морской воды в осадки [57, 58]. Исходя из сказанного, в окислительных фациях значения параметра Th/U будут сходны с его величиной в континентальной коре (3.89, [62]), тогда как удаление U в осадок в аноксических обстановках способствует существенному снижению Th/U (например, в черных сланцах зон апвеллинга Намибийского шельфа величина Th/U составляет ~0.34 [45 и ссылки там], а в черных сланцах кембрия Северо-Таримского бассейна этот параметр варьируется от 0.02 до 0.31 [68]).

Учитывая, что большинством специалистов признается существенным вклад в формирование поверхностных донных осадков Восточно-Сибирского моря речных выносов, мы рассмотрели также положение фигуративных точек осадков его восточной части на диаграммах $(La/Yb)_N–Eu/Eu^*$, $(La/Yb)_N–(Eu/Sm)_N^2$ и $(La/Yb)_N–Th$ [20, 26], позволяющих судить о типах речных систем, транспортировавших тонкую алюмосиликокластику в конечные водоемы стока.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среднее содержание пелитовой фракции в использованных нами для данного исследования пробах (всего – 21 шт.) пелитовых алевритов и алевритовых пелитов составляет 48.29 ± 7.60 об. % (минимальное содержание – 39.29, максимальное – 72.51 об.%). Среднее содержание $C_{орг}$ в этой выборке равно 1.77 ± 0.29 мас. % (минимум – 1.27, максимум – 2.27 мас. %).

Свойственные пелитовым алевритам и алевритовым пелитам содержания марганца (200–7200 г/т), а также значения отношения Th/U

² Так как во многих литературных источниках сведения о распределении РЗЭ в современных донных осадках морей Российской Арктики и впадающих в них крупных рек в силу разных причин неполные, мы [26] были вынуждены использовать не только диаграмму $(La/Yb)_N–Eu/Eu^*$, но и оперировать при анализе величины Eu аномалии ее “заместителем” – $(Eu/Sm)_N$ [8]. Это сделано и в настоящей работе.

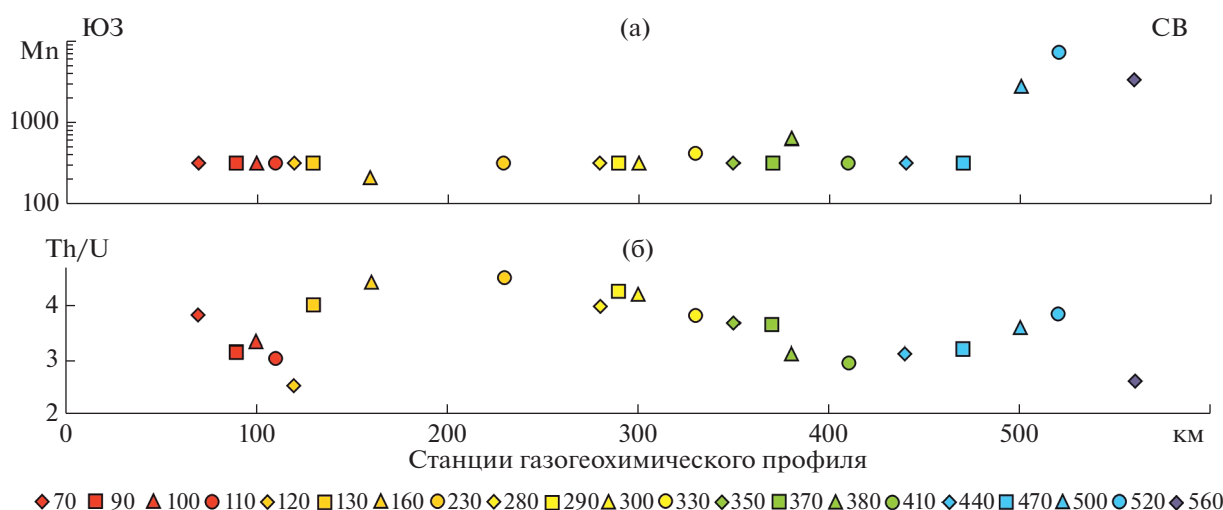


Рис. 2. Распределение содержания Mn (г/т) (а) и значений Th/U (б) в пробах поверхностных донных осадков газогеохимического профиля.

(2.53–4.55) позволяют считать, что на всем протяжении исследованного в 45-м рейсе НИС “Академик М.А. Лаврентьев” газогеохимического профиля поверхностный слой осадков характеризовался окисленным состоянием. В распределении величин указанных параметров вдоль профиля нет каких-либо определенных закономерностей (рис. 2), за исключением того, что наличие в осадках аномалий метана создает специфические физико-химические условия и способствует концентрированию на ряде станций Mn [39].

Между содержанием в пробах пелитового компонента и некоторых редких и рассеянных элементов наблюдается умеренная или выраженная положительная корреляция. Так, для La, V, Co, Hf и U значения коэффициента корреляции (r) составляют от 0.32 до 0.49, а для Yb, Th, Pb, Cr и Sc они несколько выше (0.66...0.75).

Между содержанием $C_{\text{орг}}$ и некоторыми редкими и рассеянными элементами также можно видеть умеренную или выраженную положительную корреляцию. Для Yb, Co, Hf и U величины коэффициента корреляции с $C_{\text{орг}}$ варьируются от 0.19 до 0.49; при этом между содержанием La и $C_{\text{орг}}$ корреляция практически отсутствует ($r = 0.05$). Напротив, Th, V, Pb, Cr и Sc обладают величинами r от 0.59 (Th) до 0.76 (V и Cr).

Эти данные не противоречат представлениям о том, что распределение редких и рассеянных элементов в поверхностном слое осадков вдоль газогеохимического профиля контролируется рядом факторов — содержанием $C_{\text{орг}}$, пелитовой фракции и органоминеральных/металлоорганических комплексов (Fe, V, Cr, Pb, Ba, Th, Hf, U, PЗЭ и др.), а также присутствием в осадках аномалий метана (Mn, Cu) [38, 39], однако точно

оценить вклад каждого фактора на имеющемся материале достаточно трудно.

Между величинами индикаторных отношений Th/Co, Th/Sc, La/Sc и Th/Cr и содержанием в пелитовых алевритах и алевритовых пелитах пелитового компонента и $C_{\text{орг}}$ наблюдается отрицательная корреляция.

Нормирование содержаний ряда редких и рассеянных элементов в поверхностных донных осадках по профилю, расположенному к западу от о. Врангеля, к среднему постархейскому австралийскому глинистому сланцу (PAAS, [64]) показало, что только среднее содержание V в рассматриваемой нами выборке несколько больше, чем в данном референтном геохимическом объекте (1.12 PAAS). Среднее содержание остальных элементов (Sc, Cr, Co, Ni, Cu, Y, La, Gd, Yb, Hf, Pb, Th и U) варьируется от 0.37 (Cu) до 0.91 (Gd) PAAS. Максимальные концентрации перечисленных элементов изменяются от 0.48 (Hf) до 1.85 (V) PAAS (рис. 3). Сумма лантаноидов, за исключением Ho, варьируется в исследованных нами пробах от ~105 до ~135 г/т. В PAAS сумма PЗЭ составляет ~185 г/т. Это показывает (при условии хорошего качества аналитики), что содержание пелитового компонента — одного из основных концентраторов многих редких и рассеянных элементов в донных осадках — в исследованных пробах несколько меньше, чем в PAAS. Предполагать же специфический состав размывавшихся в области питания комплексов пород, веских оснований у нас нет. В целом по профилю в однотипных по гранулометрическому составу образцах (пелитовые алевриты и алевритовые пелиты) не наблюдается какой-либо выраженной тенденции к росту содержания элементов от континента в сторону открытого моря.

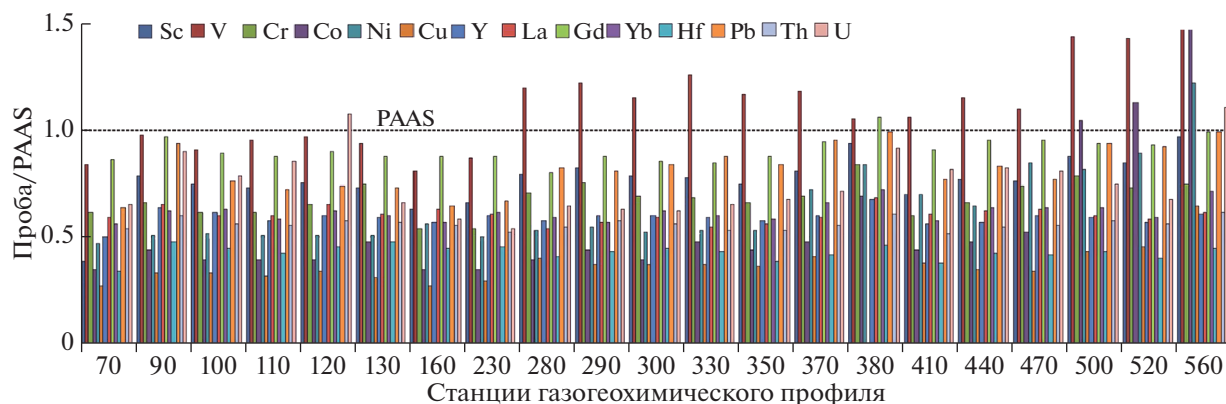


Рис. 3. Нормированное к РААС распределение некоторых редких и рассеянных элементов в пробах поверхностных донных осадков, отобранных на газогеохимическом профиле, расположенном к западу от о. Врангеля.

На диаграмме Cr/Th–Th/Sc [43, 47] точки проб поверхностных донных осадков из рассматриваемой нами выборки весьма компактно расположены в области значений, предполагающих, что в их составе присутствует порядка 20–30% продуктов размыва основных магматических пород (рис. 4а). В то же время, если рассматривать положение каждой индивидуальной пробы на данном графике, видно, что те из них, что отобраны мористее (например, пробы 290...560), характеризуются несколько большей долей основного компонента (рис. 4б).

На диаграмме La/Sc–Th/Co [49] все фигуративные точки проб донных осадков также тяготеют к области составов, характерных для продуктов разрушения магматических пород кислого состава (рис. 4в). В то же время пробы, отобранные на станциях 500, 520 и 560, занимают здесь несколько обособленное положение, будучи смещенными от остальной совокупности точек в сторону меньших значений отношения Th/Co. Это дает основание считать, что доля продуктов разрушения пород основного состава в них, по всей видимости, немного выше, чем в остальных пробах.

Весьма компактно расположены все точки проб и на диаграмме Sc–Th/Sc [50] (рис. 4г). К сожалению, в известной нам литературе отсутствуют сведения о содержании Cr, Th, Sc и Co в поверхностных донных осадках Чукотского моря, а также западной и центральной частей Восточно-Сибирского моря (или всего моря в целом). Это не позволяет сравнить распределение на приведенных выше диаграммах точек состава поверхностных проб осадков, отобранных по профилю к западу от о. Врангеля, с данными по составу поверхностных осадков указанных морей.

Средняя величина индикаторного отношения La/Sc для всей выборки проб составляет 1.81 ± 0.59 (минимум – 0.71, максимум – 3.71; последнее значение характерно для пробы 70, отобранной в начале газогеохимического профиля). Распреде-

ление его значений в индивидуальных пробах вдоль профиля достаточно равномерное (рис. 5а), хотя ряд проб (например, отобранные на станциях 500 и 520), расположенных на максимальном расстоянии от берега, по присущим им величинам La/Sc несколько ближе к средним известково-щелочным базальтам позднего протерозоя (0.39, по [46]), чем основная масса проб в анализируемой нами выборке.

Примерно так же распределены вдоль газогеохимического профиля величины Th/Sc. Среднее значение данного индикаторного отношения для всей совокупности проб составляет 0.69 ± 0.14 (в средних известково-щелочных базальтах позднего протерозоя – 0.08 [46]). Минимальная величина Th/Sc составляет 0.58 (проба 560), максимальная равна 1.26 (проба 70). Это как будто бы указывает на заметное снижение значения данного отношения в сторону от берега, но при исключении “аномальной” пробы 70 можно видеть, что распределение значений Th/Sc в индивидуальных пробах вдоль газогеохимического профиля достаточно однообразное (рис. 5б).

Почти столь же однообразным представляется распределение в пробах по профилю значений отношения Cr/Th (рис. 5в). Его средняя величина составляет 9.15 ± 0.83 при изменении в коридоре от 7.32 до 10.38. Как и в случае двух других рассмотренных выше индикаторных отношений, величины Cr/Th в поверхностных донных осадках западной о. Врангеля заметно ближе к значению данного параметра в РААС (7.53), нежели к тем, что характерны для средних известково-щелочных базальтов позднего протерозоя (58.46) или средним протерозойским гранитам (1.00, все по [46]).

Распределение значений индикаторного отношения $(La/Yb)_N^3$ в индивидуальных пробах вдоль профиля имеет, напротив, иной характер (рис. 5г). Средняя величина данного параметра для всей

³ Здесь и далее все нормировано по хондриту [64].

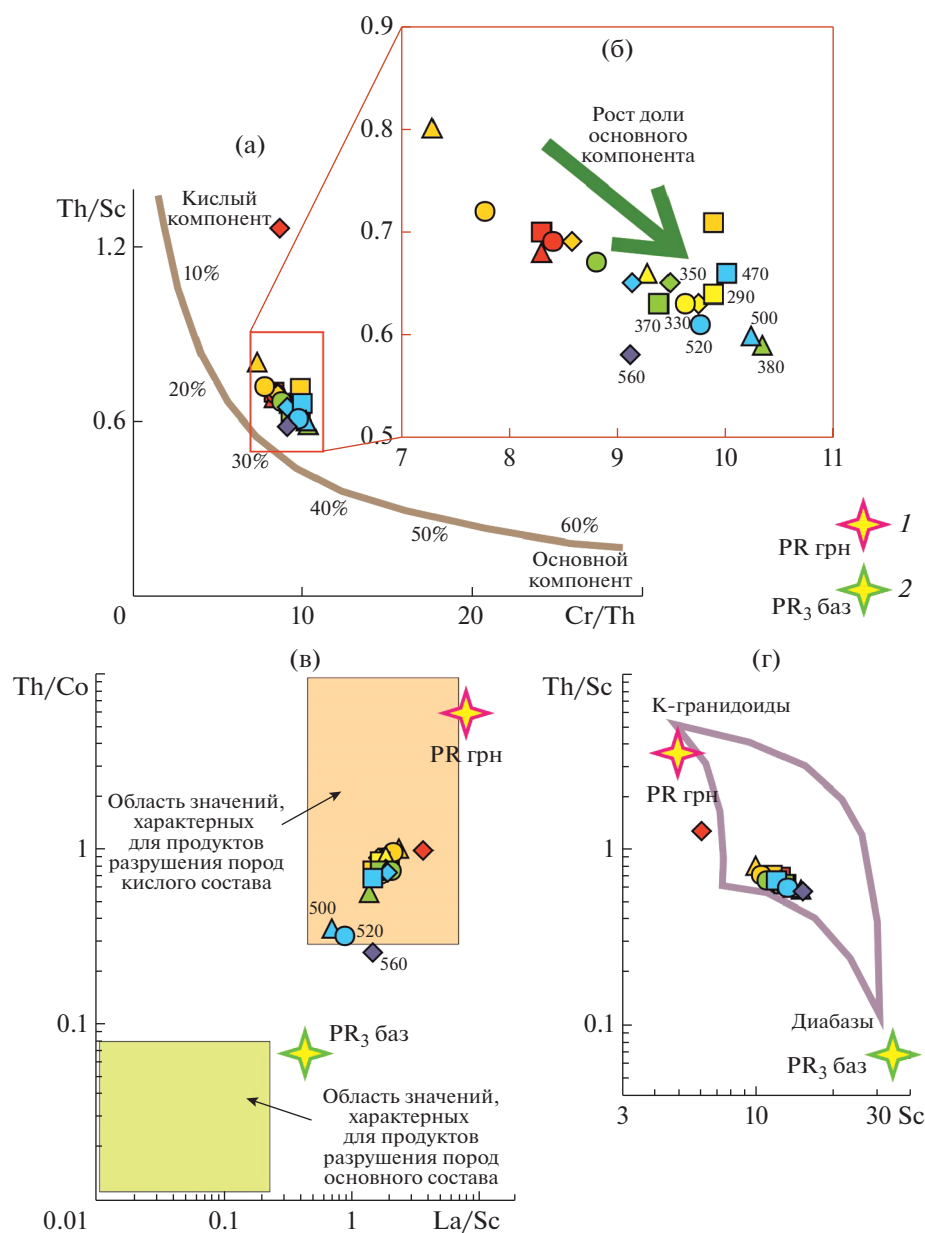


Рис. 4. Положение точек состава поверхностных донных осадков, отобранных на газогеохимическом профиле западнее о. Врангеля на диаграммах Cr/Th–Th/Sc (а, б), La/Sc–Th/Co (в) и Sc–Th/Sc (г).

1 – средние протерозойские граниты; 2 – средние позднепротерозойские известково-щелочные базальты, все по [46]. Здесь и далее число у точки индивидуальной пробы отвечает номеру станции, на которой они отобраны.

выборки проб составляет 8.99 ± 0.57 (минимум – 7.85, максимум – 10.09). Это заметно выше, чем среднее значение $(La/Yb)_N$ для известково-щелочных базальтов позднего протерозоя (3.38, по [46]) и коридор значений $(La/Yb)_N$ (1.15...3.72) для амфиболитов о. Врангеля. Для гранитов, милонитизированных и расланцованных их разностей и риолитов о. Врангеля свойственен диапазон значений $(La/Yb)_N$, полностью перекрывающий вариации данного параметра в поверхностных донных осадках газогеохимического профиля (соответственно 3.49...34.70 и 7.85... 10.09). Если

рассматривать только мусковитовые граниты (образцы 14-012-03 и 14-040-01 [52]), то значения $(La/Yb)_N$ для них составляют 3.49 и 10.75, и это позволяет думать, что названные магматические образования могли являться источниками тонкой алюмосиликоккластики для поверхностных донных осадков восточной части Восточно-Сибирского моря.

Примечательно, что в целом вся рассматриваемая нами совокупность проб характеризуется величинами $(La/Yb)_N$, заметно меньшими, чем поверхностные донные осадки западной части

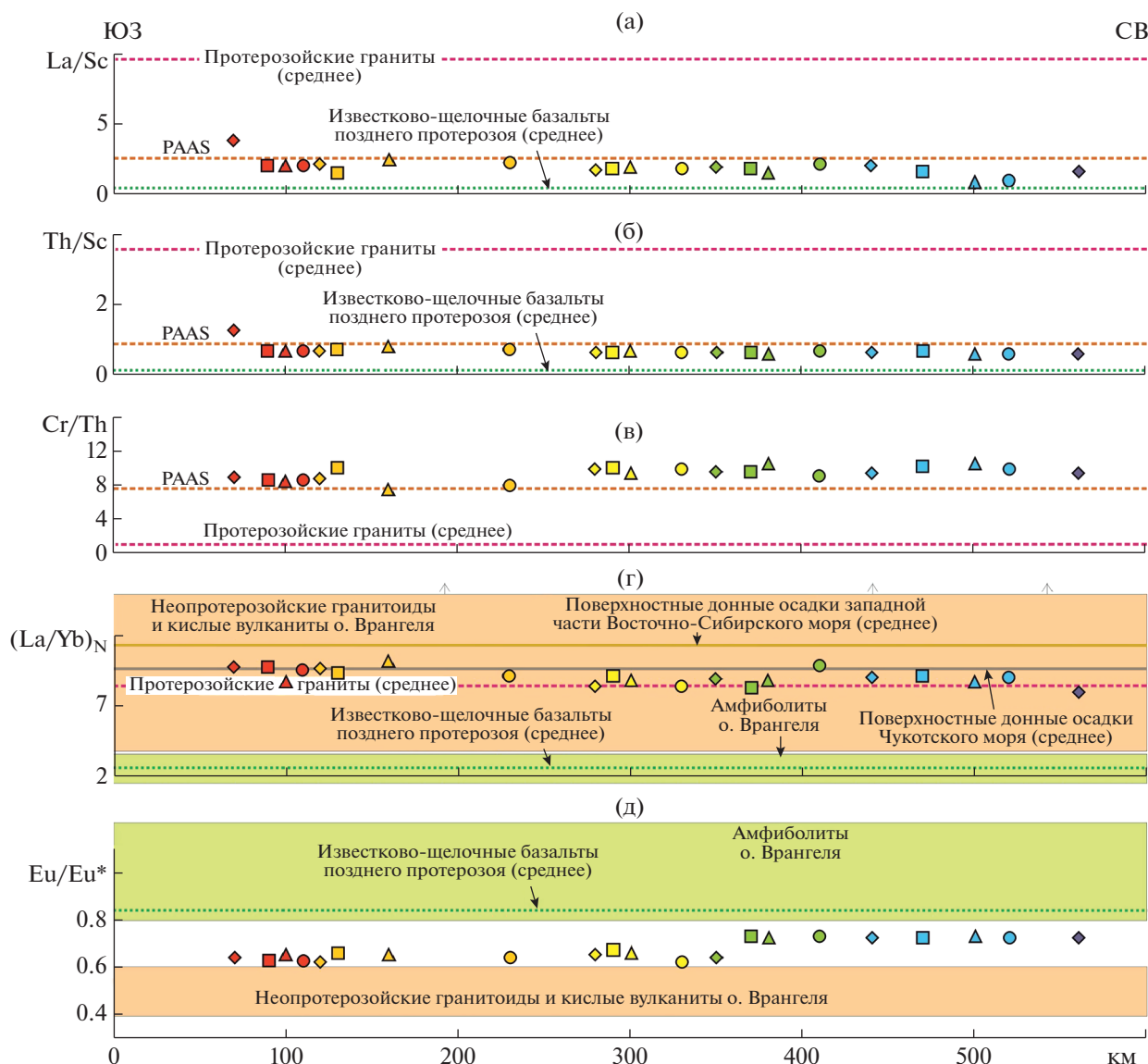


Рис. 5. Распределение значений La/Sc (а), Th/Sc (б), Cr/Th (в), (La/Yb)_N (г) и Eu/Eu* (д) в пробах поверхностных донных осадков газогеохимического профиля. Условные обозначения – см. рис. 2.

Восточно-Сибирского моря, для которых данный параметр равен 11.30 (рассчитано по данным [1]). Для многих из проб (например, пробы, отобранные на станциях 100, 230, 280, 300...380, 440 и др.) величина отношения (La/Yb)_N также меньше, чем средняя величина данного параметра для поверхностных донных осадков Чукотского моря (9.80, рассчитано по данным, приведенным в публикации [1]).

Наконец, величина отрицательной европейской аномалии в поверхностных осадках профиля ведет себя заметно иначе, чем все другие, рассмотренные выше индикаторные отношения. В целом для исследуемой выборки проб пелитовых алевроитов и алевроитовых пелитов ее среднее

значение составляет 0.67 ± 0.04 (минимум – 0.62, максимум – 0.73). Однако на рис. 5д хорошо видно, что в пробах со станций 70...350 значение $Eu/Eu^*_{\text{среднее}}$ равно 0.64 ± 0.01 , а в пробах, отобранных мористее (пробы со станций 370...560), этот параметр составляет 0.72 ± 0.01 , т.е. отрицательная европейская аномалия значимо ниже. Хорошо выражено различие проб двух указанных групп и на графике распределения РЗЭ, нормированных к хондриту (рис. 6).

Обратимся теперь, учитывая, что формирование поверхностных донных осадков шельфовых морей Российской Арктики происходит при существенном влиянии речного стока, к распределению точек состава проб пелитовых алевроитов и

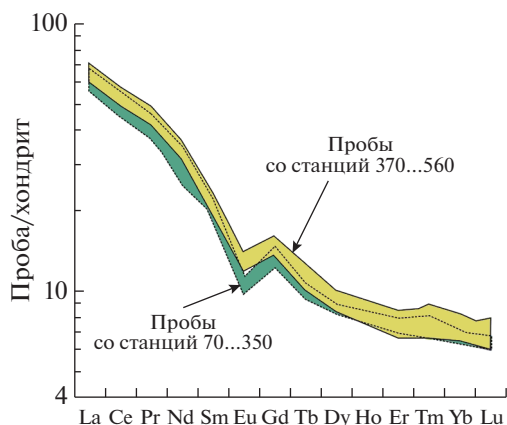


Рис. 6. Спектры распределения нормированных к хондриту лантаноидов в поверхностных донных осадках газогеохимического профиля.

алевритовых пелитов газохимического профиля на диаграммах $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$, $(La/Yb)_N - (Eu/Sm)_N$ и $(La/Yb)_N - Th$ [20, 26], где с учетом данных публикации [42] показаны области состава алеврито-пелитовых осадков, образованных под влиянием крупных рек, а также рек, дренирующих водосборы, сложенные преимущественно осадочными, магматическими и метаморфическими и вулканическими образованиями.

На диаграмме $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$ точки исследуемой нами совокупности проб сосредоточены в зоне перекрытия областей состава алеврито-пелитовых осадков крупных рек и рек, питающихся преимущественно продуктами размыва осадочных пород (рис. 7а). На этом графике по данным, приведенным в работах [34, 52], показаны также

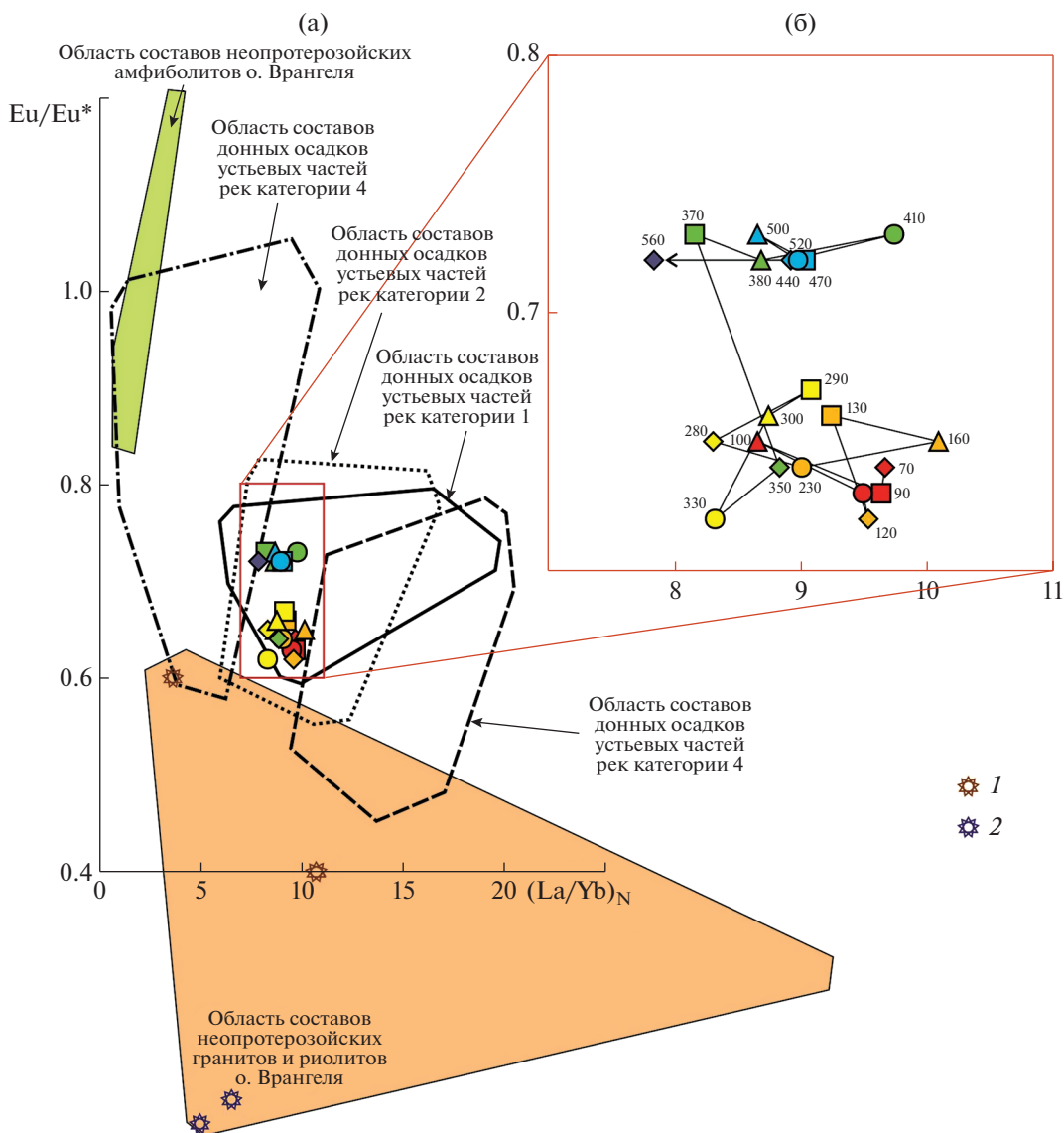


Рис. 7. Распределение точек проб пелитовых алевритов и алевритовых пелитов, отобранных вдоль газогеохимического профиля, на диаграмме $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$. 1 – мусковитовые граниты; 2 – риолиты.

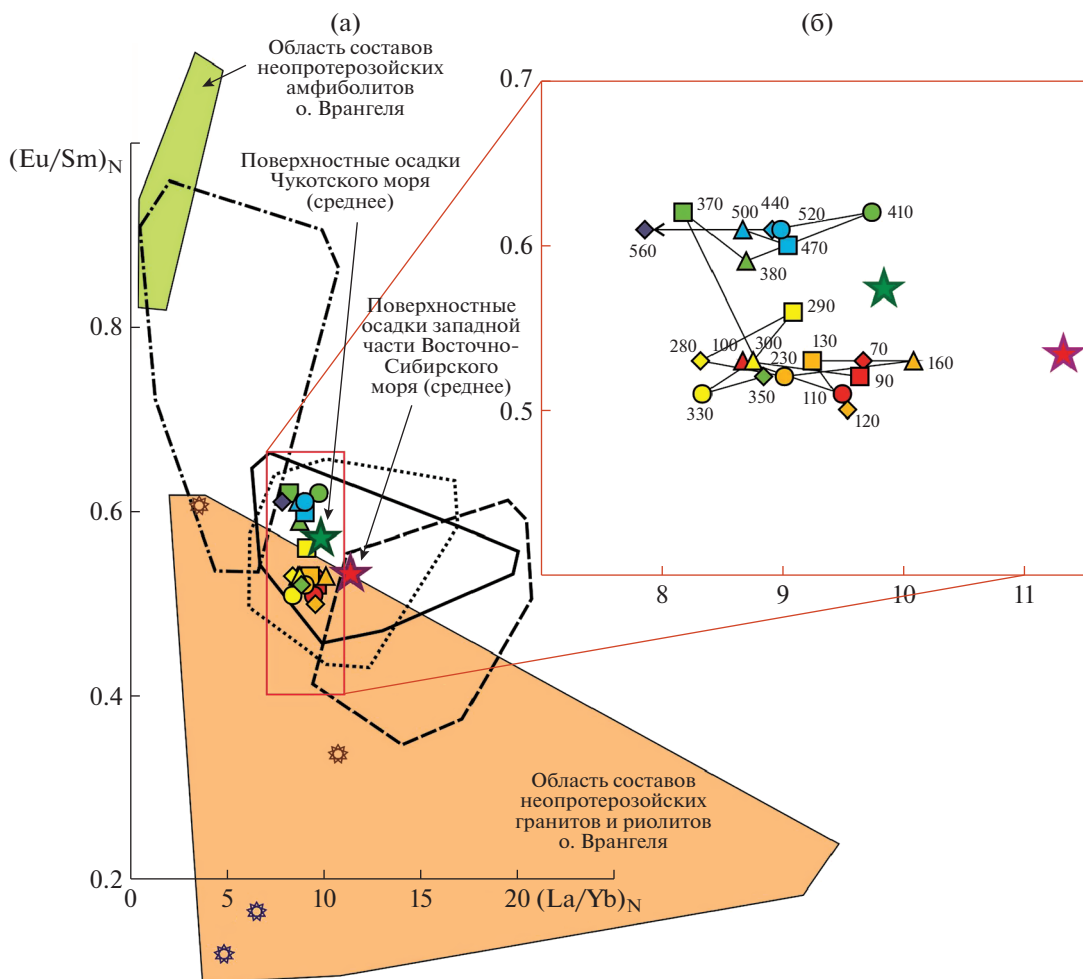


Рис. 8. Распределение точек проб пелитовых алевроитов и алевроитовых пелитов, отобранных вдоль газогеохимического профиля, на диаграмме $(La/Yb)_N - (Eu/Sm)_N$. Условные обозначения – см. рис. 2 и 7.

области состава неопротерозойских амфиболитов, гранитов и риолитов о. Врангеля. Очевидно, что последние, скорее всего, не могут рассматриваться как источники тонкой алюмосиликокластики для поверхностных донных осадков газогеохимического профиля, расположенного западнее о. Врангеля, так как присущие им значения $(La/Yb)_N$ и Eu/Eu^* заметно отличаются от тех, что характерны для восточной части Восточно-Сибирского моря. И на основной диаграмме, и на врезке к ней (рис. 7б) хорошо видно, что в составе совокупности проб осадков, отобранной вдоль указанного профиля, есть две группы. К первой, обладающей значениями $Eu/Eu^* < 0.67$, относятся пробы, отобранные на станциях 70...350. Пробы второй группы имеют меньшие величины отрицательной европиевой аномалии ($Eu/Eu^* > 0.70$) при примерно тех же значениях $(La/Yb)_N$, что и пробы первой группы.

На графике $(La/Yb)_N - (Eu/Sm)_N$ (рис. 8а) вся совокупность проб, отобранных вдоль газогеохи-

мического профиля, сосредоточена в зоне перекрытия областей состава алевроито-пелитовых осадков крупных рек и рек, дренирующих водосборы, сложенные в основном осадочными породами. Указанная совокупность проб также распадается на две группы, характеризующиеся разными величинами $(Eu/Sm)_N$. К первой группе принадлежат пробы, отобранные на станциях 70...350, ко второй – пробы со станций 370...560 (рис. 8б). По величине $(Eu/Sm)_N$ пробы первой группы сопоставимы с поверхностными донными осадками западной части Восточно-Сибирского моря, тогда как в пробах второй группы названный параметр несколько выше, чем средняя его величина для поверхностных донных осадков Чукотского моря. Положение области составов неопротерозойских амфиболитов о. Врангеля на данном графике, так же как и на диаграмме $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$, заметно отличается от положения точек поверхностных донных осадков газогеохимического профиля, тогда как область со-

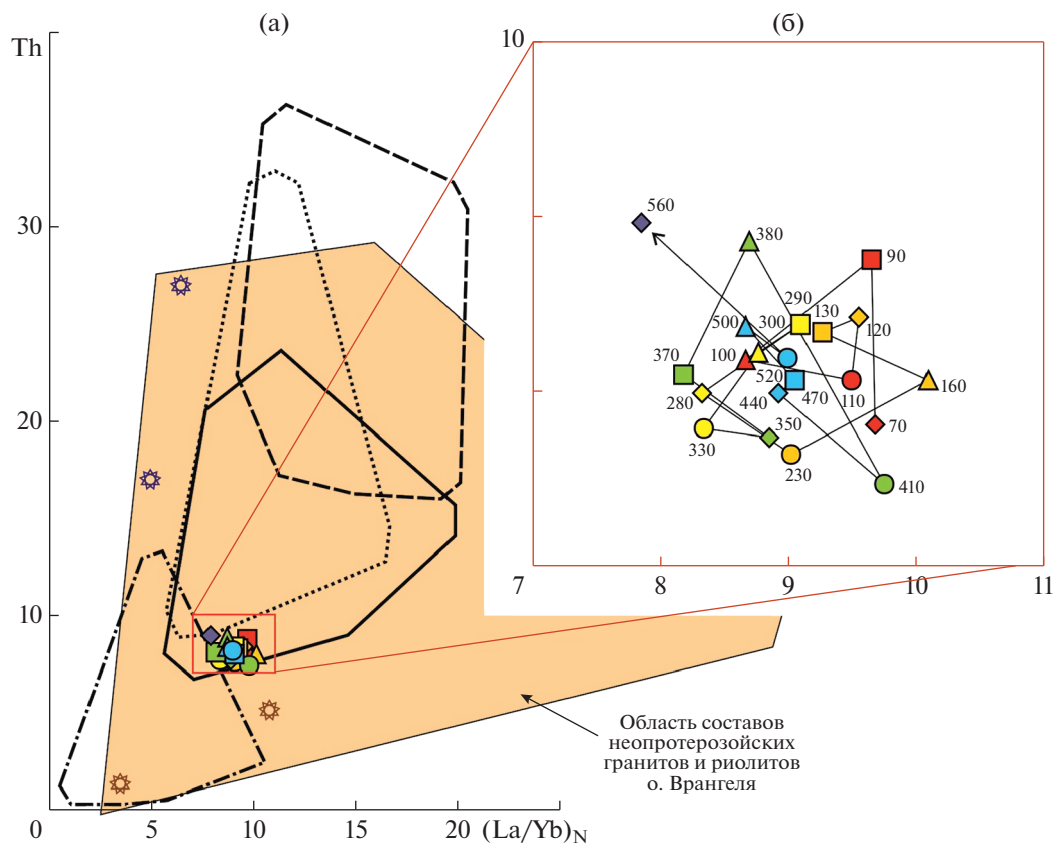


Рис. 9. Распределение точек проб пелитовых алевритов и алевритовых пелитов, отобранных вдоль газогеохимического профиля, на диаграмме $(La/Yb)_N$ -Th. Условные обозначения – см. рис. 2 и 7.

ставов гранитов и риолитов того же возраста имеет перекрытие с осадками первой группы. Однако представляется, что указанное обстоятельство не свидетельствует в пользу того, что кислые магматические породы врангелевского комплекса могли быть реально источниками тонкой алюмосиликокластики для осадков первой группы. Положение индивидуальных точек и мусковитовых гранитов, и их тектонизированных разновидностей, и риолитов на данном графике заметно иное, чем точек поверхностных донных осадков. Существенное сходство распределения точек состава поверхностных донных осадков на графиках $(La/Yb)_N$ -Eu/Eu* и $(La/Yb)_N$ -(Eu/Sm)_N показывает, что (Eu/Sm)_N действительно является хорошим “заменителем” Eu/Eu* в случаях отсутствия в распоряжении исследователя полных спектров РЗЭ.

Наконец, на диаграмме $(La/Yb)_N$ -Th точки пелитовых алевритов и алевритовых пелитов, пробы которых отобраны вдоль газогеохимического профиля западнее о. Врангеля, весьма компактно расположены в области составов алеврито-пелитовых осадков крупных рек (рис. 9а). Какие-либо группы в составе данной совокупности выделены

здесь быть не могут (рис. 9б). Представленная на данном графике область составов неопротерозойских кислых магматических пород врангелевского комплекса характеризуется существенным перекрытием с областями состава алеврито-пелитовых осадков всех четырех категорий рек, но образующие его индивидуальные точки гранитов и риолитов характеризуются заметно иным положением, нежели рассматриваемая нами совокупность проб восточной части Восточно-Сибирского моря. Это делает предположение о формировании последних за счет материала, поступавшего с о. Врангеля, маловероятным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенная на рис. 1 схема циркуляции поверхностных вод на западе Чукотского и востоке (в окрестностях о. Врангеля) Восточно-Сибирского морей и данные работ [6, 36, 59, 67 и др.], предполагают, что в указанной части Российского восточно-арктического шельфа происходит перенос тонкой алюмосиликокластики из Берингова моря в Чукотское море и далее на запад. Так как в районе о. Врангеля течения характеризуются

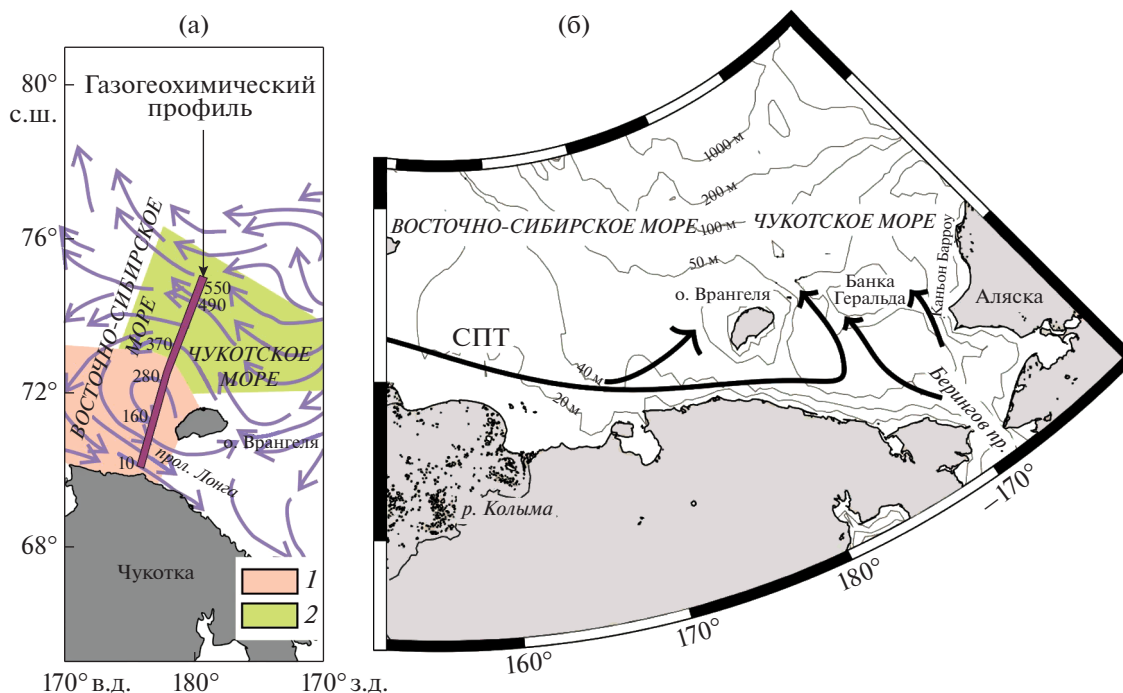


Рис. 10. Предполагаемое по геохимическим данным распределение поверхностных донных осадков, сформированных за счет разных источников в окрестностях о. Врангеля (а) и схема распределения здесь основных течений по данным [66] (б).

1 – осадки с геохимическими характеристиками, сходными с осадками Восточно-Сибирского моря; 2 – осадки с геохимическими характеристиками, сходными с осадками Чукотского моря. СПТ – Сибирское прибрежное течение. Остальные условные обозначения – те же, что на рис. 1.

ся циклонической направленностью, то можно ожидать, что на всем протяжении 550-километрового газогеохимического профиля, пройденного в 2008 г. западнее о. Врангеля экспедицией на НИС “Академик М.А. Лаврентьев”, состав тонкозернистых поверхностных данных осадков должен быть схожим с составом донных отложений Чукотского моря.

Выполненный нами анализ геохимических особенностей проб пелитовых алевроитов и алевроитовых пелитов, отобранных вдоль указанного газогеохимического профиля, показал, однако, что это не совсем так. Исследованная совокупность проб по величинам индикаторных отношений Cr/Th , Th/Co , La/Sc , а также европиевой аномалии, Eu/Eu^* и $(Eu/Sm)_N$, разбивается на две группы. В состав первой входят пробы, отобранные на станциях 70...350 регионального газогеохимического профиля, в состав второй – пробы, отобранные на станциях 370...560, т.е. дальше от берега и северо-западнее о. Врангеля, как раз в области течений из Чукотского моря.

На диаграммах $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$ и $(La/Yb)_N - (Eu/Sm)_N$ точки исследованной совокупности проб сосредоточены в зоне перекрытия областей состава алевроито-пелитовых осадков крупных рек (реки категории 1 по [26]) и рек, питающихся

преимущественно продуктами размыва осадочных пород (реки категории 2 [26]). Состав поверхностных донных осадков газогеохимического профиля на данных диаграммах, так же как и на диаграмме $(La/Yb)_N - Th$, достаточно отчетливо отличается от состава известных на о. Врангеля неопротерозойских амфиболитов, гранитоидов и риолитов, поэтому последние, скорее всего, не могли являться источниками тонкой алюмосиликоккластики для них.

Положение точек индивидуальных проб поверхностных донных осадков, отобранных западнее и северо-западнее о. Врангеля на диаграммах $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$ и $(La/Yb)_N - (Eu/Sm)_N$, также показывает существование в составе исследованной нами выборки двух групп проб. К первой относятся пробы, отобранные на станциях 70...350, ко второй – пробы со станций 370...560. Пробы первой группы по величинам Eu/Eu^* и $(Eu/Sm)_N$ сопоставимы или достаточно близки к поверхностным донным осадкам западной и центральной частей Восточно-Сибирского моря. Пробы второй группы по указанным параметрам ближе к их средним величинам, характерным для поверхностных донных осадков Чукотского моря. Это дает основание думать, что поверхностные донные осадки к северо-западу от о. Врангеля сфор-

мированы под влиянием течений, выносящих тонкую алюмосиликокластику из Чукотского моря, тогда как в их “тени”, западнее о. Врангеля (рис. 10а), состав осадков контролируется в основном материалом, поступающим из западных и центральных районов Восточно-Сибирского моря с Сибирским прибрежным течением и проходящими, по представлениям авторов работы [66 и ссылки в этой статье], западнее и северо-западнее о. Врангеля его ветвями (рис. 10б).

Благодарности. Автор искренне признателен М.И. Тучковой за помощь в подборе литературы, М.Д. Кравчишиной и В.П. Шевченко за консультации по ряду вопросов и Н.С. Глушковой за подготовку иллюстраций к данной работе.

Источник финансирования. Исследования выполнены в рамках госзадания ГИН РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Астахов А.С., Семилетов И.П., Саттарова В.В. и др.* Редкоземельные элементы донных осадков восточно-арктических морей России как индикаторы терригенного сноса // Докл. АН. 2018. Т. 482. № 4. С. 451–455.
2. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. М.: Управление навигации и океанографии МО РФ, 1980. 184 с.
3. Биогеохимия органического вещества арктических морей / Под ред. Грамберга И.С. М.: Наука, 1982. 240 с.
4. *Вержбицкий В.Е., Соколов С.Д., Тучкова М.И.* Современная структура и этапы тектонической эволюции острова Врангеля (Российская Восточная Арктика) // Геотектоника. 2015. № 3. С. 3–35.
5. *Ветров А.А., Семилетов И.П., Дударев О.В. и др.* Исследование состава и генезиса органического вещества донных осадков Восточно-Сибирского моря // Геохимия. 2008. № 2. С. 183–195.
6. *Вологина Е.Г., Калужин И.А., Дарьин А.В. и др.* Позднеголоценовое осадконакопление в активных геологических структурах Чукотского моря // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 1. С. 199–219.
<https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0345>
7. *Друщиц В.А., Садчикова Т.А.* Позднекайнозойское терригенное осадконакопление на шельфе Восточной Арктики // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории. Материалы VII Всероссийского литологического совещания. Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2013. Т. 1. С. 280–282.
8. *Дубинин А.В.* Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 360 с.
9. *Дударев О.В.* Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России. Автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2016. 49 с.
10. *Дударев О.В., Чаркин А.Н., Шахова Н.Е. и др.* Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России. Томск: Изд-во ТПУ, 2016. 192 с.
11. Интерпретация геохимических данных / Под ред. Скларова Е.В. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 288 с.
12. *Калиненко В.В.* Глинистые минералы в осадках Арктических морей // Литология и полез. ископаемые. 2001. № 4. С. 418–429.
13. *Косько М.К., Авдюничев В.В., Ганелин В.Г. и др.* Остров Врангеля: геологическое строение, минерогения, геоэкология. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2003. 137 с.
14. *Левитан М.А., Васнер М., Нюрнберг Д., Шелехова Е.С.* Средний состав ассоциаций глинистых минералов в поверхностном слое донных осадков Северного Ледовитого океана // Докл. АН. 1995. Т. 344. № 3. С. 364–366.
15. *Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р.* Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики в течение последних 130 тыс. лет. М.: ГЕОС, 2007. 404 с.
16. *Лисицын А.П.* Ледовая седиментация в морях и океанах. М.: Наука, 1994. 448 с.
17. *Маслов А.В.* Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных. Екатеринбург: УГГУ, 2005. 289 с.
18. *Маслов А.В., Козина Н.В., Ключиткин А.А. и др.* Распределение редкоземельных элементов и систематика $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в современных донных осадках Каспийского моря // Докл. АН. 2014. Т. 459. № 2. С. 203–207.
19. *Маслов А.В., Козина Н.В., Ключиткин А.А. и др.* Распределение ряда редких и рассеянных элементов в современных донных осадках Каспийского моря // Океанология. 2016. Т. 56. № 4. С. 605–617.
20. *Маслов А.В., Козина Н.В., Шевченко В.П. и др.* Систематика редкоземельных элементов в современных донных осадках Каспийского моря и устьевых зон рек Мира: опыт сопоставления // Докл. АН. 2017. Т. 475. № 2. С. 195–201.
21. *Маслов А.В., Кузнецов А.Б., Политова Н.В. и др.* Изотопный состав Nd, Pb и Sr современных донных осадков Баренцева моря // Докл. АН. 2019. Т. 485. № 1. С. 71–75.
22. *Маслов А.В., Кузнецов А.Б., Политова Н.В. и др.* Распределение редких и рассеянных элементов и изотопный состав Nd, Pb и Sr в современных донных осадках Баренцева моря // Геохимия. 2020. Т. 65. № 6. С. 566–582.
23. *Маслов А.В., Мельничук О.Ю., Титов Ю.В., Червяковская М.В.* Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 2. Лито- и изотопно-геохимические подходы и методы // Литосфера. 2020. Т. 20. № 1. С. 40–62.
24. *Маслов А.В., Политова Н.В., Козина Н. и др.* Редкие и рассеянные элементы в современных донных осадках Баренцева моря // Литология и полез. ископаемые. 2020. № 1. С. 3–27.
25. *Маслов А.В., Политова Н.В., Шевченко В.П. и др.* Систематика Co, Hf, Se, Sr, Th и редкоземельных элементов в современных донных осадках Баренцева моря // Докл. АН. 2019. Т. 485. № 2. С. 81–86.
26. *Маслов А.В., Шевченко В.П.* Систематика редких земель и Th во взвеси и донных осадках устьевых зон разных категорий/классов рек мира и ряда крупных рек Российской Арктики // Геохимия. 2019. Т. 64. № 1. С. 59–78.

27. Маслов А.В., Шевченко В.П., Подковыров В.Н. и др. Особенности распределения элементов-примесей и редкоземельных элементов в современных донных осадках нижнего течения р. Северной Двины и Белого моря // Литология и полез. ископаемые. 2014. № 6. С. 463–492.
28. Маслов А.В., Шевченко В.П., Ронкин Ю.Л. и др. Систематика Th, Sr, Hf, Co и редкоземельных элементов в современных донных осадках Белого моря и бассейна нижнего течения р. Северная Двина // Докл. АН. 2012. Т. 443. № 2. С. 214–220.
29. Маслов А.В., Школьник С.И., Летникова Е.Ф. и др. Ограничения и возможности литогеохимических и изотопных методов при изучении осадочных толщ. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 2018. 382 с.
30. Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Асадулин Э.Э. и др. Экологическое состояние и минералого-геохимические характеристики донных осадков Восточно-Сибирского моря // Океанология. 2020. Т. 60. № 4. С. 595–610.
31. Николаева Н.А., Деркачев А.Н., Дударев О.В. Особенности минерального состава осадков шельфа восточной части моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря // Океанология. 2013. Т. 53. № 4. С. 529–538.
32. Панова Е.В., Рубан А.С., Дударев О.В. и др. Литологические особенности донных осадков и их влияние на распределение органического материала на территории восточно-сибирского шельфа // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 8. С. 94–105.
33. Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 300 с.
34. Соколов С.Д., Силантьев С.А., Моисеев А.В. и др. Амфиболиты метаморфического фундамента о. Врангеля: возраст, природа протолита и условия метаморфизма // Геохимия. 2019. Т. 64. № 12. С. 1222–1246.
35. Соколов С.Д., Тучкова М.И., Моисеев А.В. и др. Тектоническая зональность острова Врангеля (Арктика) // Геотектоника. 2017. № 1. С. 3–18.
36. Чаркин А.Н. Особенности современного осадкообразования в Восточно-Сибирском море. Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2012. 26 с.
37. Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И. Некоторые газогеохимические особенности осадков Восточно-Сибирского моря // Региональные проблемы. 2012. Т. 15. № 1. С. 33–40.
38. Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И. Газогеохимические аномалии в осадках Восточно-Сибирского моря // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1. Вып. № 21. С. 98–110.
39. Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И., Зарубина Н.В. Газогеохимические особенности осадков Восточно-Сибирского моря // Вестник ДВО РАН. 2010. № 6. С. 101–108.
40. Яшин Д.С. Голоценовый седиментогенез арктических морей России // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. Вып. 3. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2000. С. 57–67.
41. Anderson L.G., Bjork G., Jutterstrom S. et al. East Siberian Sea, an Arctic region of very high biogeochemical Activity // Biogeosciences. 2011. V. 8. P. 1745–1754. www.biogeosciences.net/8/1745/2011/
<https://doi.org/10.5194/bg-8-1745-2011>
42. Bayon G., Toucanne S., Skonieczny C. et al. Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited // Geochim. Cosmochim. Acta. 2015. V. 170. P. 17–38.
43. Braccialli L., Marroni M., Pandolfi L., Rocchi S. Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source areas to configuration of margins // Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspectives from Petrography and Geochemistry / Arribas J., Critelli S., Johnsson M.J. (eds.). Geological Society of America Special Papers. 2007. V. 420. P. 73–93.
44. Brennecke G.A., Herrmann A.D., Algeo T.J., Anbar A.D. Rapid expansion of oceanic anoxia immediately before the end-Permian mass extinction // Proceedings of the National Academy of Sciences, USA. 2011. V. 108. P. 17631–17634.
45. Brumsack H.-J. The trace metal content of recent organic carbon-rich sediments: Implications for Cretaceous black shale formation // Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol. 2006. V. 232. P. 344–361.
46. Condie K.C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // Chem. Geol. 1993. V. 104. P. 1–37.
47. Condie K.C., Wronkiewicz D.A. The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution // Earth Planet. Sci. Lett. 1990. V. 97. P. 256–267.
48. Cullers R.L. The control on the major- and trace-element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the Wet Mountains region, Colorado, USA // Chem. Geol. 1995. V. 123. P. 107–131.
49. Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // Chem. Geol. 2002. V. 191. P. 305–327.
50. Fedo C.M., Young G.M., Nesbitt H.W. Paleoclimatic control on the composition of the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada: a greenhouse to icehouse transition // Precambrian Res. 1997. V. 86. P. 201–223.
51. Inorganic geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks: Evolutionary Considerations to Mineral Deposit-Forming Environments / Lentz D.R. (ed.). Geological Association of Canada, GeoText 4, 2003. 184 p.
52. Luchitskaya M.V., Moiseev A.V., Sokolov S.D. et al. Neoproterozoic granitoids and rhyolites of Wrangel Island: Geochemical affinity and geodynamic setting in the Eastern Arctic region // Lithos. 2017. V. 292–293. P. 15–33.
53. McLennan S.M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes // Geochemistry and mineralogy of rare earth elements / Lipin B.R., McKay G.A. (eds.). Rev. Mineral. Geochem. 1989. V. 21. № 1. P. 169–200.
54. McLennan S.M., Hemming S.R., McDaniel D.K., Hanson G.N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics // Processes controlling the composition of clastic sediments / Johnsson M.J., Basu A. (eds.). Geological Society of America Special Papers. 1993. V. 284. P. 21–40.

55. *McLennan S.M., Taylor S.R.* Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends // *J. Geol.* 1991. V. 99. P. 1–21.
56. *McLennan S.M., Taylor S.R., McCulloch M.T., Maynard J.B.* Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1990. V. 54. P. 2015–2050.
57. *McManus J., Berelson W., Severmann S. et al.* Molybdenum and uranium geochemistry in continental margin sediments: paleoproxy potential // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2006. V. 70. P. 4643–4662.
58. *Morford J.L., Emerson S.* The geochemistry of redox sensitive trace metals in sediments // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1999. V. 63. P. 1735–1750.
59. *Naidu A.S., Creager J.S., Mowatt T.C.* Clay mineral dispersal patterns in the North Bering and Chukchi seas // *Mar. Geol.* 1982. V. 47. P. 1–15.
60. *Naidu A.S., Mowatt T.C.* Sources and dispersal patterns of clay minerals in surface sediments from the continental-shelf areas off Alaska // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1983. V. 94. P. 841–854.
61. *Rollinson H.R.* Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Essex: London Group UK Ltd., 1994. 352 p.
62. *Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the Continental Crust // *Treatise of Geochemistry.* 2003. V. 3. P. 1–64.
63. *Salvado J.A., Tesi T., Sundbom M. et al.* Contrasting composition of terrigenous organic matter in the dissolved, particulate and sedimentary organic carbon-pools on the outer East Siberian Arctic Shelf // *Biogeosciences.* 2016. V. 13. P. 6121–6138.
64. *Taylor S.R., McLennan S.M.* The Continental Crust: Its Composition and Evolution. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks. Blackwell Sci. Publ.: Oxford, Great Britain, 1985. 312 p.
65. *Taylor S.R., McLennan S.M.* The chemical evolution of the continental crust // *Rev. Geophys.* 1995. V. 33. P. 241–265.
66. *Viscosi-Shirleya C., Pisiya N., Mammone K.* Sediment source strength, transport pathways and accumulation patterns on the Siberian-Arctic's Chukchi and Laptev shelves // *Cont. Shelf Res.* 2003. V. 23. P. 1201–1225.
67. *Wahsner M., Müller C., Stein R. et al.* Clay-mineral distribution in surface sediments of the Eurasian Arctic ocean and continental margin as indicator for source areas and transport pathways – a synthesis // *Boreas.* 1999. V. 28. № 1. P. 215–233.
68. *Yu B., Dong H., Widom E., Chen J., Lin C.* Geochemistry of basal Cambrian black shales and cherts from the Northern Tarim Basin, Northwest China: Implications for depositional setting and tectonic history // *J. of Asian Earth Sciences.* 2009. V. 34. P. 418–436.
69. *Zhang F., Zhu X., Yan B. et al.* Oxygenation of a Cryogenian ocean (Nanhua Basin, South China) revealed by pyrite Fe isotope compositions // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2015. V. 429. P. 11–19.

Sources of Bottom Sediments in the East Part of Eastern Siberian Sea (Reconstruction on Geochemical Data)

A. V. Maslov[#]

Geological institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]*e-mail: amas2004@mail.ru*

Based on the analytical materials obtained in 2008 during the expedition to the R/V “Akademik M.A. Lavrentiev” along the regional gas-geochemical profile, stretching 550 km from Billings Point towards the underwater Mendeleev ridge, a reconstruction of the features of the formation of the composition of bottom sediments (pelitic aleurites and aleurite pelites) in the eastern part of the East Siberian Sea was carried out. It was found that the studied set of samples for the values of Cr/Th, Th/Co, La/Sc, as well as Eu/Eu* and (Eu/Sm)_N, consists of two groups. The first group includes samples taken at stations 70...350 of the gas geochemical profile. The second group includes samples taken at stations 370...560. On the diagrams (La/Yb)_N-Eu/Eu* and (La/Yb)_N-(Eu/Sm)_N, the sample data points are concentrated in the overlap zone of the compositional areas of silty-pelitic sediments of large rivers and rivers feeding mainly on products of erosion of sedimentary rocks. The distribution of the data points of bottom sediments on these diagrams, as well as on the (La/Yb)_N-Th diagram, differs from the distribution of data points of the Neoproterozoic amphibolites, granitoids, and rhyolites of Wrangel Island; therefore, the latter, most likely, could not be sources of thin aluminosiliciclastics. The samples of the first group are quite close to the surface sediments of the East Siberian Sea in terms of Eu/Eu* and (Eu/Sm)_N values and a number of other parameters. On the contrary, the samples of the second group are closer to the bottom sediments of the Chukchi Sea. Apparently, the bottom sediments northwest of Wrangel Island were formed under the influence of currents carrying thin aluminosilicoclastic material from the Chukchi Sea. To the west of Wrangel Island, the composition of the sediments is controlled mainly by material coming from the western and central regions of the East Siberian Sea.

Keywords: East Siberian Sea, bottom sediments, geochemistry, sources of fine-grained aluminosiliciclastics