

## НАКОПЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА, ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МОРСКОМ ОСАДКЕ НА РАЗЛИЧНОМ РАССТОЯНИИ ОТ ДЕЛЬТЫ РЕКИ ИНДИГИРКА

© 2020 г. В. С. Севастьянов<sup>а</sup>, \*, О. В. Кузнецова<sup>а</sup>, В. С. Федулов<sup>а</sup>, В. Ю. Федулова<sup>а</sup>, Н. В. Душенко<sup>а</sup>, С. Г. Наймушин<sup>а</sup>, Я. В. Бычкова<sup>б</sup>, А. П. Кривенко<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН, ул. Косыгина, 19, Москва, 119991 Россия

<sup>б</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, ГСП-1, Ленинские горы, Москва, 119234 Россия

\*e-mail: vsev@geokhi.ru

Поступила в редакцию 20.06.2020 г.

После доработки 07.07.2020 г.

Принята к публикации 07.07.2020 г.

Проведенные исследования показали, что при удалении от дельты р. Индикирки на расстояние от 50 до 600 км от берега концентрация тяжелого изотопа углерода органического вещества (ОВ) в поверхностном слое морского осадка возрастает и, соответственно, уменьшается количество терригенного ОВ в морском осадке примерно в 1.4 раза. Также методом ICP-MS было показано, что концентрация тяжелых металлов уменьшается в 1.3–2.1 раза, а редкоземельных элементов (РЗЭ) в 1.3–1.4 раза при увеличении расстояния от дельты р. Индикирки. Наблюдается высокий уровень корреляции между содержанием ОВ, тяжелых металлов и РЗЭ в морских осадках, за исключением содержания элементов Cd и W. Показано, что на расстоянии 50 км от дельты реки содержание тяжелых металлов превышает их среднюю концентрацию в земной коре, а содержание РЗЭ превышает концентрации элементов в Северо-Американском сланце NASC. На расстоянии 600 км от дельты реки наблюдается обратная картина.

**Ключевые слова:** изотопный состав углерода, Восточно-Сибирское море, Индикирка, морские осадки, органическое вещество, тяжелые металлы, редкоземельные элементы, ICP-MS, микроволновое разложение

DOI: 10.31857/S0016752520120043

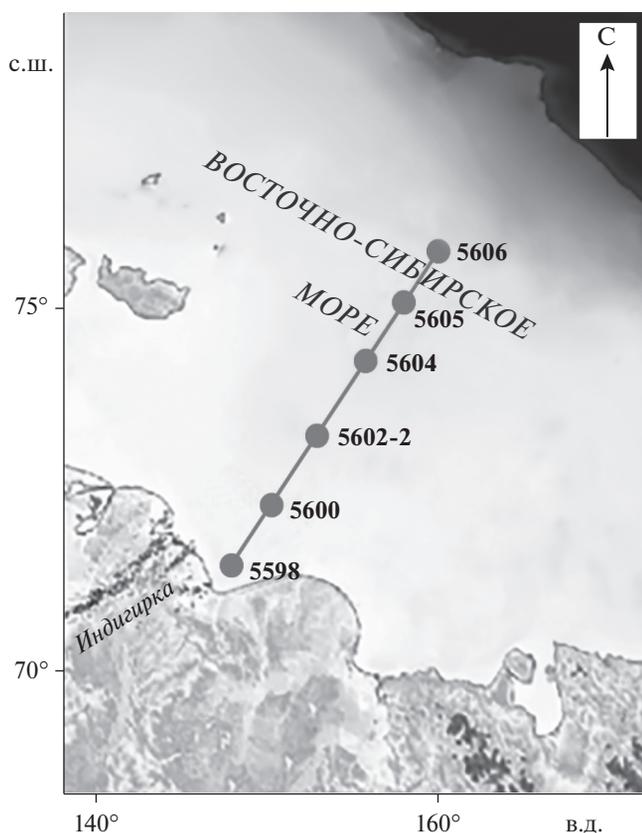
### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время Восточная Арктика является одним из важнейших направлений научных исследований в силу многих экологических, геополитических, экономических и других факторов. Большой интерес представляет изучение процессов осадконакопления и преобразования ОВ в Арктике, тесно связанных с изменением климата, антропогенным воздействием и формированием полезных ископаемых. Особенностью седиментогенеза в Восточно-Сибирском море являются мелководность, объем речного стока и распространение речных вод (Ветров и др., 2008; Флинт и др., 2018). Поверхность Восточно-Сибирского моря большую часть года покрыта льдом, даже к концу лета море открывается на 35%.

Большая часть шельфа Чукотского и Восточно-Сибирского морей покрыта восстановленными серыми, темно-серыми или черными осадками. Донные осадки имеют тонкозернистую структуру вне зависимости удаленности от побережья Во-

сточно-Сибирского моря (Астахов и др., 2013; Иванов и др., 2012).

Повышение температуры в Арктическом регионе приводит к оттаиванию вечной мерзлоты, увеличению речного стока, уменьшению площади ледяного покрытия и возрастанию количества штормов. В результате деградации вечной мерзлоты из почвы освобождаются растворимые соли металлов и ОВ, которые выносятся речным стоком в море. Увеличение темпов деградации прибрежной и подводной мерзлоты на Восточно-Сибирском шельфе приводит к вовлечению в современный биогеохимический цикл огромного количества органического вещества, что может существенно повлиять на происходящие в наше время биогеохимические процессы (Панова и др., 2017; Kipp et al., 2018). Известны работы (Шакиров и др., 2013; Shakhova et al., 2010, 2019), в которых было показано, что в Восточно-Сибирском море в результате деградации многолетнемерзлых пород



**Рис. 1.** Схема маршрута и положение станций пробоотбора на разрезе дельта р. Индигирки – граница постоянных льдов (Севастьянов и др., 2019). Масштаб 1 : 10000, проекция Меркатора.

происходят выбросы в атмосферу большого количества парниковых газов, в том числе  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ .

Согласно оценкам, приведенным в (Ветров и др., 2008), основными источниками ОВ в Восточно-Сибирском море являются первичная фотосинтетическая продукция (15 млн т  $\text{C}_{\text{орг}}$ /год), продукты волновой абразии и термоабразии берегов (2.2 млн т  $\text{C}_{\text{орг}}$ /год), речной сток (1.9 млн т  $\text{C}_{\text{орг}}$ /год), эоловые поступления (0.16 млн т  $\text{C}_{\text{орг}}$ /год) и подземный сток (0.1 млн т  $\text{C}_{\text{орг}}$ /год). Однако 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 и, следовательно, представленного его более устойчивыми компонентами. Влияние реки Индигирки, одной из крупнейших рек, впадающих в Восточно-Сибирское море, на седиментогенез заметно даже на расстоянии более 500 км от побережья (Bröder et al., 2016). В других морях Арктики массовый перенос с суши обычно сказывается на гораздо более коротких расстояниях в диапазоне 5–20 км (Terán-Vaa-

monde et al., 2017). Также можно предположить, что пресноводный комплекс, который несет Индигирка, оказывает влияние на загрязнение шельфовой зоны тяжелыми металлами. При этом важно понять, как шельф реагирует на возрастающие потоки органического и неорганического вещества, какие процессы происходят в морском осадке и водной толще.

Несмотря на то, что имеется большое количество работ, посвященных изучению ОВ в морской воде и осадках, известно только небольшое количество работ (Ветров и др., 2008; Иванов и др., 2012; Кодина, 1994; Леин и др., 2012; Панова и др., 2017; Шакиров и др., 2013; Kipp et al., 2018), в которых исследовалось ОВ в морских осадках Восточно-Сибирского моря. Еще меньше работ посвящено определению содержания тяжелых металлов (Астахов и др., 2013; Новиков, Жилин, 2016; Шакиров и др., 2013; Kuznetsova et al., 2020) и РЗЭ (Astakhov et al., 2019) в Восточно-Сибирском море. И практически не имеется работ, в которых рассматривается распределение содержания ОВ, тяжелых металлов, РЗЭ в зависимости от расстояния от устья рек Индигирки и Колымы, которые оказывают существенное влияние на осадконакопление в Восточно-Сибирском море. Поэтому становится очевидной необходимость изучения процессов современного осадкообразования, и, в том числе, поиска взаимосвязи тяжелых металлов, РЗЭ и  $\text{C}_{\text{орг}}$  в донных осадках на территории Восточно-Сибирского шельфа.

Целью данной работы являлось изучение закономерностей накопления органического вещества, тяжелых металлов и редкоземельных (РЗЭ) элементов в морских осадках Восточно-Сибирского моря при увеличении расстояния от дельты р. Индигирки по направлению к материковому склону.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Во время проведения арктического рейса № 69 на НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2017 г. был осуществлен пробоотбор образцов донных осадков и выделение поровых газов из донных осадков вдоль меридионального профиля от дельты р. Индигирки до границы постоянных льдов. Карта со станциями отбора проб показана на рис. 1. Координаты станций и глубины в точках пробоотбора приведены в табл. 1. Первая станция № 5598 располагалась от берега на расстоянии 50 км, Расстояние между крайними станциями 5598 и 5606 разреза составляло 550 км. Глубина моря в местах отбора морских осадков изменялась от 13 до 48 м (Севастьянов и др., 2019).

Колонку морских осадков извлекали с помощью боксорера (БК). Затем для проведения исследовательского отбирали пробы на горизонте 12–20 см. Осадки

**Таблица 1.** Станции пробоотбора на разрезе дельта р. Индигирки – граница постоянных льдов (Севастьянов и др., 2019)

Номер станции	Координаты	Глубина, м	Расстояние от берега, км
5598	N 71°28.0' E 152°54.0'	13	50
5600	N 72°19.5' E 154°32.0'	20	200
5602-2	N 73°13.9' E 156°27.7'	27	300
5604	N 74°05.0' E 158°20.0'	25	400
5605	N 74°52.0' E 160°10.0'	45	500
5606	N 75°38.0' E 162°00.0'	48	600

были алеврито-пелитового типа, на отдельных станциях наблюдалась примесь песка. Пробы объемом 300 мл высушивали в сушильном шкафу при температуре 50°C в течение 48 ч. Затем пробы перетирали в шаровой мельнице до размера частиц ~60 мкм и проводили “горячую” экстракцию ОВ из осадков в аппарате Сокслета смесью бензола и метанола (9 : 1 об.) в течение 36 ч. Полученный раствор фильтровали, растворители отгоняли с помощью роторного испарителя (Севастьянов и др., 2019).

Изотопный состав углерода экстрагированного органического вещества измеряли при использовании Flash EA 1112 элементного анализатора (Thermo Scientific, Германия), соединенного с Delta Plus XP масс-спектрометром изотопных отношений (Thermo Fisher Scientific, Бремен, Германия). Температура окислительного реактора составляла 1020°C, восстановительного реактора – 650°C. Каждый образец анализировали не менее трех раз.

Проверку правильности измерений осуществляли по международному стандарту масла NBS 22 ( $\delta^{13}C_{VPDB} = -29.7\text{‰}$ ). Стандартное отклонение результатов измерения составляло  $\pm 0.2\text{‰}$ .

Измерения концентрации металлов методом ICP-MS проводили с использованием масс-спектрометра Element 2 (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA). Оптимизированные рабочие параметры и настройки прибора приведены в табл. 2. Образцы вводили с помощью распылителя с поперечным потоком, устойчивого к HF. Использовали стандартную горелку (горелка типа Фасселя) с платиновым инжектором, также инертным по отношению к HF. Программа ChemStation использовалась для контроля работы и обработки результатов измерений.

Для разложения применяли 65% HNO<sub>3</sub> и 40% HF кислоты (Merck, Германия), 37% HCl и 70% HClO<sub>4</sub> кислоты (Panreac, Испания) и 99.5%

H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> кислоту (Sigma-Aldrich). Растворы готовили с использованием деионизированной воды, полученной из системы очистки NANO Pure (Thermo Fisher Scientific, США) (удельное сопротивление 18.2 MΩ см). Использовали многоэлементные и одноэлементные стандартные образцы фирмы High Purity Standards (США). Сертифицированные стандартные образцы донных отложений озера Байкал (БИЛ-2) и реки Вислы (МОДАС-2) были получены из Института геохимии им. В.И. Виноградова (Новосибирск, Российская Федерация). Разложение проводили в микроволновой системе Mars 5 (СЕМ Microwave Technology Ltd., Великобритания). Оптимизация условий пробоподготовки, проверка правильности измерений морских осадков подробно описана в работах (Kuznetsova et al., 2019, 2020).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерение изотопного состава углерода ОВ морских осадков Восточно-Сибирского моря показало, что значения  $\delta^{13}C$  увеличиваются от -31.3 до -29.0‰ (рис. 2) по мере продвижения от дельты р. Индигирки по направлению к склону шельфа. Это доказывает, что доминирующее влияние на характер ОВ в морском осадке Восточно-Сибирского моря оказывает пресноводный комплекс, выносимый р. Индигиркой и другими реками.

**Таблица 2.** Параметры, используемые для ICP-MS измерений

Плазмообразующий поток аргона	13–15 л/мин
Вспомогательный поток аргона	0.6–1.1 л/мин
Поток аргона в распылителе	0.6–1.1 л/мин
Расход анализируемого образца	0.8 мл/мин
Выходная мощность генератора	1200–1300 Вт
Разрешение прибора	Низкое (R = 300)
Внутренний стандарт	In

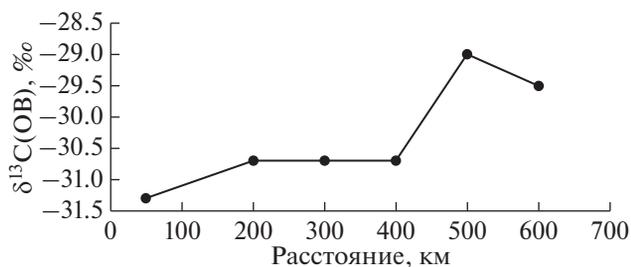


Рис. 2. Изменение величины  $\delta^{13}\text{C}(\text{ОВ})$  в морском осадке в зависимости от расстояния от дельты р. Индигирки.

Терригенное ОВ может включать как современное органическое вещество, в различной степени подвергшееся преобразованию по пути в морскую среду, так и ОВ продуктов абразии древних пород, в том числе легко разрушающихся многолетнемерзлых пород.

Для оценки доли терригенного вещества в морском осадке была использована формула материально-изотопного баланса (Sharp, 2007):

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{терр}}(x) + \delta^{13}\text{C}_{\text{фито}}(1 - x),$$

где  $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{терр}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{фито}}$  – изотопный состав углерода ОВ, терригенного ОВ и фитопланктонного вещества в морском осадке, соответственно;  $x$  – доля терригенного вещества в ОВ морского осадка.

Принимая значение  $\delta^{13}\text{C}_{\text{фито}} = -25\text{‰}$  для ОВ морского генезиса в осадке (Ветров и др., 2008; Галимов, Коди́на, 1982; Дударев, 2016; Леин и др., 2012), была рассчитана доля терригенного вещества на различном расстоянии от дельты реки Индигирки. На расстоянии ~600 км от дельты

р. Индигирки доля терригенного вещества в ОВ морского осадка составила 0.73%, т.е. количество терригенного ОВ в морском осадке уменьшилось примерно в 1.4 раза. На рис. 3 показано, как по мере удаления от дельты р. Индигирки общее содержание экстрагированного ОВ и терригенного ОВ в осадке уменьшалось, за исключением колонки, отобранной на станции 5605. Содержание ОВ в этой колонке возросло примерно до 1 мг/г. По-видимому, такая локализация ОВ связана с особенностью рельефа морского дна и с окончанием влияния пресноводного стока р. Индигирки, несущего терригенное вещество и минеральную взвесь, на физико-химические характеристики морской воды (Флинт и др., 2018). Кроме того, локальное повышение величины  $\delta^{13}\text{C}$  (рис. 2) указывает на увеличенное содержание морского ОВ в колонке, отобранной на станции 5605.

Содержание тяжелых металлов и (РЗЭ) в зависимости от расстояния от дельты р. Индигирки представлено в табл. 3. На рис. 4, 5 приведены кривые распределения концентрации тяжелых металлов в зависимости от расстояния от устья р. Индигирки относительно их средних концентраций в земной коре (Виноградов, 1962), а кривые распределения концентрации РЗЭ на рис. 6, 7 приведены относительно содержания РЗЭ в Северо-Американском сланце NASC (Gromet et al., 1984). Из рис. 4 видно, что концентрация тяжелых металлов уменьшается неравномерно с увеличением расстояния от дельты р. Индигирки: от 50 до 200 км от берега происходит резкое снижение концентрации тяжелых металлов, на расстоянии от 200 до 600 км градиент концентрации уменьшается. В общем концентрация тяжелых металлов от первой станции до последней понижается в 1.3–2.1 раза. Было замечено, что на расстоянии 500 км наблюдается небольшое повышение кон-

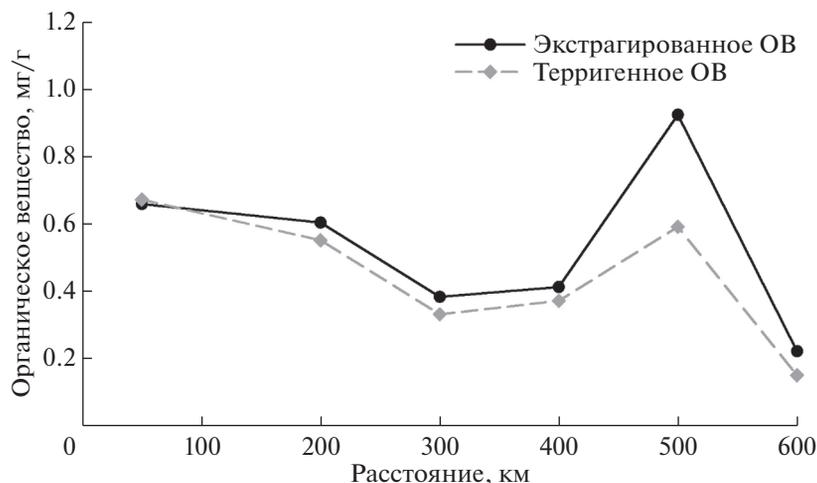


Рис. 3. Изменение концентрации экстрагированного ОВ в морском осадке в зависимости от расстояния от дельты р. Индигирки.

центрации Co, Zn, Cd, Pb, Sn по сравнению с концентрацией в колонке предыдущей станции 5604. Кроме того, общие закономерности распределения концентрации тяжелых металлов нарушаются для Cd и W, для которых наблюдается обратная картина, повышение концентрации при увеличении расстояния от дельты р. Индигирки в 1.4 и 1.5 раза, соответственно.

Распределение концентрации тяжелых металлов относительно их средних концентраций в земной коре показано на рис. 5. Видно, что концентрации Ti, Zn, Cd, Pb, Bi превышают их средние концентрации в земной коре до 1.5 раз вблизи дельты р. Индигирки. Особенно большое отклонение до 5 раз относительно средней концентрации в земной коре имеет Hf. На расстоянии 600 км от дельты реки только содержание Cd, Hf, Bi превышают их средние концентрации в земной коре. Содержания Ni, Cu, Tl в морском осадке меньше соответствующих средних концентраций на всем разрезе.

Кривые распределения концентрации РЗЭ с увеличением расстояния от устья р. Индигирки имеют вид подобный типичному распределению концентрации тяжелых металлов (рис. 6). Наиболее резкое уменьшение концентрации РЗЭ происходит на расстоянии от 500 до 600 км. Концентрация РЗЭ от первой до последней станции уменьшается в 1.3–1.4 раза. Концентрации РЗЭ превышают концентрации NASC вблизи дельты р. Индигирки, кроме Er, Tm, Yb, Lu (рис. 7). На расстоянии 600 км от берега почти все РЗЭ, за исключением Gd, имеют концентрацию ниже значений NASC.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для большинства изученных северных рек значения  $\delta^{13}C$  ОВ взвеси варьирует от  $-27.0$  до  $-29.2\%$  при средней величине  $-28.9\%$ . В составе речной взвеси в море приносится изотопно-легкое ОВ болотного происхождения, древнее ОВ размывающихся торфяников, континентальная растительность. Поэтому величины  $\delta^{13}C$  ОВ могут достигать очень низких значений до  $-32\%$ , как, например, в эстуарии р. Оби (Кодина, 1994). Значения  $\delta^{13}C$  во взвеси Восточно-Сибирского моря изменяются от  $-32.4$  до  $-25.2$  и от  $-29.4$  до  $-24.9\%$ , соответственно для вод поверхностного и придонного горизонтов (Иванов и др., 2012).

Содержание ОВ в морских осадках Восточно-Сибирского моря изменяется от 0.34 до 1.89%. Относительно большие содержания  $C_{орг}$  (1.0–1.89%) наблюдались в дельте рек Индигирки и Колымы (Астахов и др., 2013; Панова и др., 2017). Среднемноголетнее содержание  $C_{орг}$  взвеси в водах западной части Восточно-Сибирского моря почти в 2 раза ниже по сравнению с восточной ча-

Таблица 3. Содержание элементов (мкг/г) в зависимости от расстояния от дельты р. Индигирки

Элемент	Расстояние от берега, км					
	50	200	300	400	500	600
Ti <sup>a</sup>	5.1	4.8	4.5	4.4	4.3	3.9
Cr	77	62	56	53	52	47
Co	19.19	15.45	13.98	16.49	17.85	16.48
Ni	40.43	30.89	29.70	29.40	29.19	24.73
Cu	30.01	22.19	20.29	18.39	17.29	14.32
Zn	128.88	99.62	98.18	102.47	105.62	85.47
Cd	0.18	0.20	0.15	0.24	0.28	0.26
Pb	27.04	19.47	17.71	17.34	17.55	15.52
Sn	2.61	2.25	2.01	2.06	2.09	1.96
La	39.82	39.05	35.87	33.57	31.82	30.75
Ce	86.82	83.75	76.57	70.49	66.85	65.53
Pr	10	9	9	8	8	7
Nd	36.70	34.77	31.66	29.84	29.26	26.77
Sm	7.28	6.70	6.14	5.79	5.68	5.33
Eu	1.63	1.46	1.35	1.31	1.29	1.19
Gd	7.83	6.88	6.59	6.44	6.16	5.46
Tb	1.05	0.97	0.89	0.86	0.85	0.76
Dy	5.53	5.21	4.73	4.69	4.66	4.11
Ho	1.13	1.04	0.99	0.96	0.93	0.84
Er	3.32	2.97	2.79	2.76	2.72	2.37
Tm	0.48	0.44	0.41	0.41	0.40	0.35
Yb	3.16	2.88	2.77	2.68	2.58	2.33
Lu	0.49	0.43	0.41	0.41	0.41	0.34
Hf	4.90	4.16	4.00	3.98	3.96	3.23
W	1.21	1.23	0.83	0.97	1.14	1.40
Tl	0.11	0.07	0.16	0.11	0.08	0.09
Pb	27.04	19.47	17.71	17.34	17.55	15.52
Bi	0.34	0.22	0.25	0.23	0.21	0.16
Th	12.42	11.18	9.80	9.65	9.38	8.38

Примечания. <sup>a</sup>мг/г.

стью Восточно-Сибирского моря, что связано с особенностями его поступления и трансформации (Иванов и др., 2012).

На рис. 2 и 3 представлены результаты по распределению  $\delta^{13}C$  и концентрации ОВ, которые частично совпадают с результатами, полученными в вышеперечисленных работах, и частично их дополняют. Кроме того, нам не известны работы, в которых было бы получено распределение ОВ от дельты р. Индигирки до границы постоянных льдов в Восточно-Сибирском море. На рис. 3 также показана точка локализации ОВ на станции 5605, которая, по-видимому, связана с особенностями рельефа дна.

Из сравнения кривых распределения ОВ (рис. 3) и кривых распределения тяжелых металлов (рис. 4) и РЗЭ (рис. 6) можно сделать вывод, что наблюдается хорошая корреляция между распределением концентрации ОВ, тяжелых металлов и РЗЭ. Об-

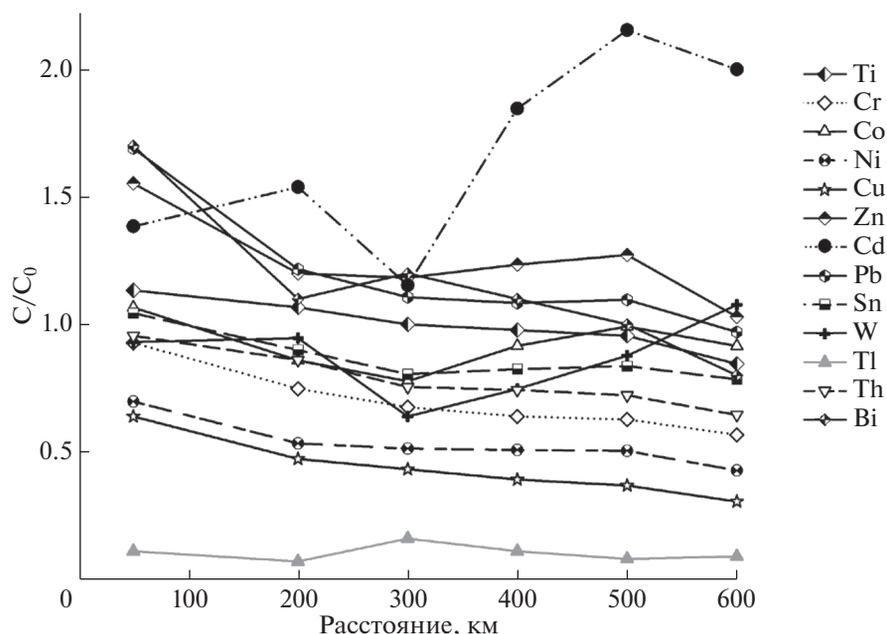


Рис. 4. Изменение концентрации тяжелых металлов в морском осадке относительно средней концентрации в земной коре ( $C_0$ ) в зависимости от расстояния от дельты р. Индигирки.

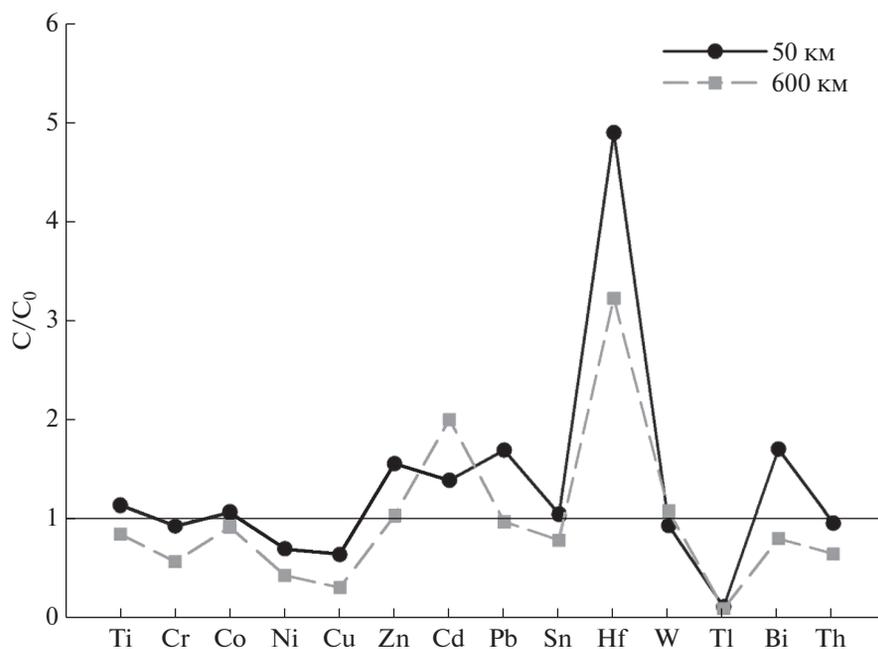


Рис. 5. Концентрация тяжелых металлов относительно их средних концентраций в земной коре ( $C_0$ ) на расстоянии 50 и 600 км от дельты р. Индигирки.

щая закономерность в распределении элементов заключается в уменьшении концентрации при увеличении расстояния от берега в 1.3–2.1 раза, увеличение концентрации  $C_{орг}$  на расстоянии 500 км сопровождается небольшим увеличением содержания некоторых тяжелых металлов (Co, Zn, Cd, Pb, Sn), показанное на кривых распределения (рис. 4).

Проведенный статистический анализ показал, что коэффициент детерминации  $R^2$ , между концентрацией ОВ (кроме станции 5605) и концентрацией тяжелых металлов Ti, Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Sn, Th, Bi изменялся от 0.644 до 0.966 (средний уровень 0.825). Наихудшая корреляция наблюдалась для Bi ( $R^2 = 0.644$ ). На расстоянии 50 км от

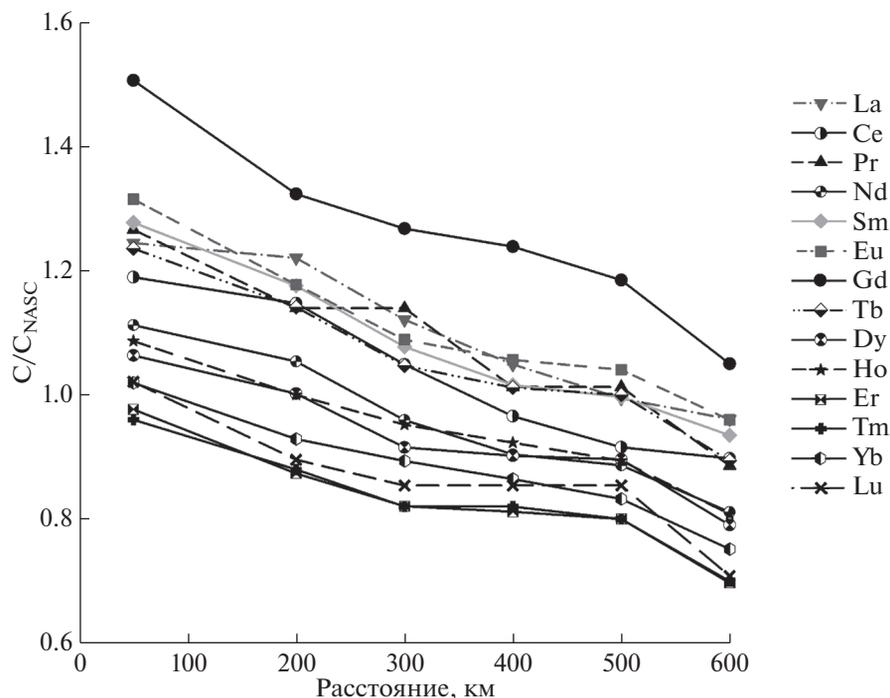


Рис. 6. Изменение концентрации РЗЭ в морском осадке в зависимости от расстояния от дельты р. Индигирки.

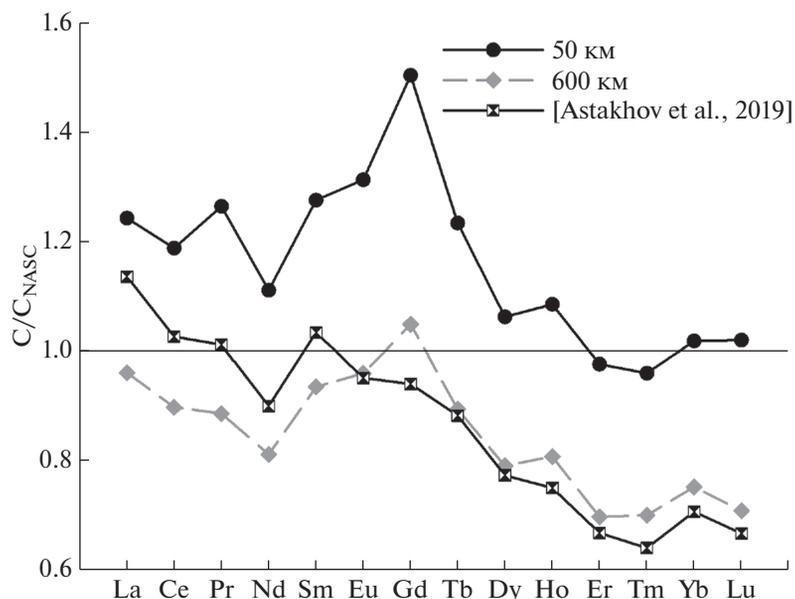


Рис. 7. Концентрация РЗЭ относительно NASC в морском осадке на расстоянии 50 и 600 км от дельты р. Индигирки.

дельты р. Индигирка концентрация Pb (27.04 мкг/г) была необычно высокой и не коррелировала с концентрацией ОВ в морском осадке, что, по-видимому, связано с дополнительным поступлением Pb при термоабразии берегов. Величина R<sup>2</sup> между концентрацией ОВ (кроме станции 5605) и концентрацией РЗЭ (15 элементов) изменялась в

пределах от 0.707 до 0.975 (средний уровень 0.904). Таким образом, средний уровень корреляции между концентрациями ОВ и РЗЭ существенно выше, чем между концентрациями ОВ и тяжелыми металлами.

Наблюдаемое синхронное снижение концентрации ОВ, тяжелых металлов Восточно-Сибир-

ского моря и РЗЭ при увеличении расстояния от дельты р. Индигирки, свидетельствует о том, что доминирующее влияние на осадконакопление оказывает пресноводный комплекс. Кроме того, более высокий уровень корреляции между концентрациями ОБ и тяжелых металлов по сравнению с уровнем корреляции соответствующих концентраций в Баренцевом море и Восточно-Сибирском море, полученных вдали от устья рек (Новиков, Жилин, 2016), является дополнительным доказательством связи тяжелых металлов с терригенным ОБ.

Для биогенных элементов корреляция с органическим углеродом вполне очевидна, так как все они поступают в осадки совместно в составе биогенных остатков растений и планктонных организмов. Наблюдалась корреляция между содержанием Cu, Ni, Zn, Pb, Cr и Co в донных отложениях во всех сочетаниях и с содержанием органического углерода в донных осадках Восточно-Сибирского моря (Астахов и др., 2013; Новиков, Жилин, 2016; Шакиров и др., 2013). Это обусловлено также тем, что Cu, Ni, Zn, Pb, Co, Cd и другие металлы могут образовывать стойкие комплексы с гумусовыми кислотами воды и донных отложений (Моисеенко и др., 2011). При этом Zn может осаждаться из водной толщи планктогенным органическим веществом и накапливаться в донных осадках водных бассейнов совместно с остатками диатомовых водорослей (Астахов и др., 2013). Известно, что среди примесных элементов наиболее тесную связь с профилем  $\text{PO}_4$  в осадках имеет Cd (Tribouillard et al., 2006), и он также может входить в состав раковин фораминиферов, подвергнутых фосфатизации (Батуринов и др., 2016). Поэтому содержание Cd повышается (в 1.4 раза) с увеличением количества морского ОБ в осадке в зависимости от расстояния от устья р. Индигирки и на расстоянии примерно 500 км от устья наблюдается небольшой максимум концентрации Cd.

Многие микроэлементы (Co, Cr, Pb, V, Y, Yb, Zn, Zr, Mo), судя по результатам корреляционного и факторного анализов, могут накапливаться в тонкозернистых осадках, что характерно для терригенных отложений, содержащих возможные компоненты-концентраторы: глинистые минералы, органическое вещество, гидроксиды железа и марганца, тонкодисперсные сульфиды железа (Астахов и др., 2013).

Таким образом, изменение содержания ОБ и распределение его компонентов зависит от поступления ОБ на дно в составе взвеси, степени разбавления минеральными компонентами, скорости захоронения, интенсивности работы донных организмов, условий минерализации и многого другого.

Общая концентрация РЗЭ на расстоянии 50 км от дельты р. Индигирки составляет 205.24 мкг/г, а

на расстоянии 600 км – 153.13 мкг/г и практически находятся в диапазоне изменения общей концентрации РЗЭ в Восточно-Сибирском море, приведенном в работе (Astakhov et al., 2019). Кривые распределения РЗЭ в донных отложениях в зависимости от расстояния от устья р. Индигирки очень похожи между собой (рис. 6) и, также как тяжелые металлы, хорошо коррелируют с изменением концентрации ОБ. На рис. 7 показано, что концентрации РЗЭ на расстоянии 600 км от дельты р. Индигирки практически совпадают с концентрациями, приведенными в работе (Astakhov et al., 2019), за исключением легких РЗЭ: La, Ce, Pr, Nd, Sm.

Концентрации РЗЭ в Восточно-Сибирском море значительно выше, чем концентрации РЗЭ в морских осадках континентальных окрестностей. РЗЭ попадают в Восточно-Сибирского моря в основном в результате эрозии берегов р. Индигирки, а также могут попадать при эрозии пород Новосибирских островов и из бассейна р. Лены.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе было показано, что доминирующее влияние на характер и распределение ОБ на практически всей изученной акватории Восточно-Сибирского моря оказывает пресноводный комплекс, выносимый р. Индигиркой. Исследование содержания металлов методом ICP-MS показало, что при удалении от дельты реки наблюдается уменьшение концентрации тяжелых металлов и РЗЭ. Синхронно уменьшается концентрация ОБ. Из-за чрезвычайной мелководности морского бассейна эффект массопереноса, хотя и идет медленно, отчетливо заметен даже на расстоянии 600 км.

Превышение содержания тяжелых металлов средних концентраций в земной коре и РЗЭ значений в NASC наблюдается только в районе выноса речного стока, а на больших расстояниях эти значения становятся меньше значений соответствующих средних концентраций в земной коре и содержаний в NASC, соответственно. Исключением является Hf, содержание которого превышает среднюю концентрацию в земной коре в 3–5 раз. Следовательно, можно утверждать, что экологическое состояние Восточно-Сибирского моря является удовлетворительным и оно не подвержено сильному антропогенному загрязнению.

*Авторы благодарят академик РАН М.В. Флинта за оказанную поддержку при проведении экспедиционных исследований на НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2017 г.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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**(10), 1348-1365.
- Батурич Г.Н., Дубинчук В.Т., Покровский Б.Г., Новигатский А.Н., Дмитренко О.Б., Оськин Н.С. (2016) Фосфатизированный карбонатный конгломерат со дна Карского моря. *Океанология* **56**(5), 757-770.
- 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., Peresyupkin V.I., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Charkin A.N. (2008) Composition and genesis of the organic matter in the bottom sediments of sea. *Geochem. Int.* **46**(2), 156-167.
- Виноградов А.П. (1962) Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. *Геохимия* (7), 555-571.
- Галимов Э.М., Кодина Л.А. (1982) *Исследование органического вещества и газов в донных толщах дна Мирового океана*. М.: Наука, 228 с.
- Дударев О.В. (2016) Современный литоморфогенез на восточном арктическом шельфе России. Автореферат дис. ... док. геол.-мин. наук. Владивосток: Тихоокеан. океанол. ин-т им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 49 с.
- Иванов М.В., Леин А.Ю., Захарова Е.Е., Саввичев А.С. (2012) Изотопный состав углерода органического вещества взвеси и донных осадков морей Восточной Арктики. *Микробиология* **81**(5), 645-655.
- Кодина Л.А. (1994) О распределении изотопов углерода между фракциями битумоида в современных морских осадках. *Геохимия* (3), 433-440.
- Леин А.Ю., Кравчишина М.Д., Политова Н.В., Саввичев А.С., Веслополова Е.Ф., Мицкевич И.Н., Ульянова Н.В., Шевченко В.П., Иванов М.В. (2012) Трансформация взвешенного органического вещества на границе вода-дно в морях Российской Арктики (по изотопным и радиоизотопным данным). *Литология и полезные ископаемые* (2), 115-145.
- Моисеенко Т.И., Паничева Л.П., Дину М.И. (2011) Инактивация токсических металлов в водах суши гумусовых веществ. *Вестник Тюменского государственного ун-та* (5), 6-19.
- Новиков М.А., Жилин А.Ю. (2016) Характер распределения тяжелых металлов в донных отложениях Баренцева моря (по результатам статистического анализа). *Вестник КРАУНЦ. Науки о земле* (1), вып. 29, 78-88.
- Панова Е.В., Рубан А.С., Дударев О.В., Тези Т., Бредер Л., Густафссон О., Гринько А.А., Шахова Н.Е., Гончаров И.В., Мазуров А.К., Семилетов И.П. (2017) Литологические особенности донных осадков и их влияние на распределение органического материала на территории Восточно-Сибирского шельфа. *Известия Томского политехнического ун-та. Инжиниринг георесурсов* **328**(8), 94-105.
- Севастьянов В.С., Федулов В.С., Федулова В.Ю., Кузнецова О.В., Душенко Н.В., Наймушин С.Г., Стенников А.В., Кривенко А.П. (2019) Изотопно-геохимические исследования органического вещества морских осадков от дельты реки Индигирки до границы постоянных льдов в Восточно-Сибирском море. *Геохимия* **64**(5), 451-459.
- Sevastyanov V.S., Fedulov V.S., Fedulova V.Y., 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.
- Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И. (2013) Геохимические аномалии в осадках Восточно-Сибирского моря. *Вестник КРАУНЦ. Науки о земле* (1), вып. 21, 98-110.
- Флинт М.В., Арашкевич Е.Г., Артемьев В.А., Баранов Б.В., Беззубова Е.М., Белевич Т.А., Веденин А.А., Галкин С.В., Гончаренко И.В., Демидов А.Б., Дриц А.В., Дроздова А.Н., Казеннов А.Ю., Косолапов Д.Б., Кравчишина М.Д., Лобус Н.В., Макавеев П.Н., Мирошниченко А.Ю., Мишин А.В., Осадчий А.А., Полухин А.А., Поярков С.Г., Пронин А.А., Римский-Корсаков Н.А., Романова Н.Д., Саввичев А.С., Суханова И.Н., Чернецкий А.Д., Шатравин А.В., Шука С.А. (2018) Экосистемы морей Сибирской Арктики. Материалы экспедиционных исследований 2015 и 2017 гг. М.: ООО "Агентство Печати и Рекламы", 232 с.
- Astakhov A.S., Sattarova V.V., Xuefa S., Limin H., Akseynov K.I., Alatorstev 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 Science* **20**, 148-159.
- Bröder L., Tesi T., Andersson A., Eglinton T.I., Semiletov I.P., Dudarev O.V., Roos P., Gustafsson Ö. (2016) Historical records of organic matter supply and degradation status in the East Siberian Sea. *Org. Geochem.* **91**, 16-30.
- Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. (1984) The "North American Shale composite". Its compilation, major and trace element characteristics. *Geochem. Cosmochim. Acta.* **48**, 2469-2482.
- Kipp L.E., Charette M.A., Moore W.S., Henderson P.B., Rigor I.G. (2018) Increased fluxes of shelf-derived materials to the central Arctic Ocean. *Science Advances* **4**, EAAO 1302. 10 p.
- Kuznetsova O.V., Burmii Zh.P., Orlova T.V., Sevastyanov V.S., Timerbaev A.R. (2019) Quantification of the diagenesis-designating metals in sediments by ICP-MS: Comparison of different sample preparation methods. *Talanta* **200**, 468-471.
- Kuznetsova O.V., Bychkova Y.V., Timerbaev A.R. (2020) Development and Validation of a Sector-Field Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (ICP-MS) Method for Analyzing the Diagenesis-Designating Metals in Marine Sediments. *Analytical Letters* **53**(4), 563-573.
- Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Salyuk A., Rekant P., Kosmach D. (2010) Geochemical and geophysical evidence of methane release over the East Siberian Arctic Shelf. *J. Geophysical Research Atmospheres* **115**(C8), 1-14.
- Shakhova N., Semiletov I., Chuviline E. (2019) Understanding the permafrost-hydrate system and associated methane releases in the east Siberian arctic shelf. *Ceosciences* **9**, 251-274.
- Sharp Z. (2007) *Principles of stable isotope geochemistry*. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 359 p.
- Terán-Baamonde J., Carlosena A., Soto-Ferreiro R.-M., Andrade J.-M., Prada D. (2017) Fast assessment of bioaccessible metallic contamination in marine sediments. *Marine Poll. Bull.* **125**, 310-317.
- Tribovillard N., Algeo T.J., Lyons T., Riboulleau A. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. *Chem. Geol.* **232**, 12-32.