

УДК 546.6:550.42:549.01:551.35(268.53)

ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЖЕЛЕЗИСТЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ И ДОННЫХ ОСАДКАХ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

О.Н. Колесник, А.Н. Колесник, А.С. Астахов

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

Проанализированы геохимические и минералогические аспекты распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в железистых образованиях (ЖО) и донных осадках юго-восточной части моря Лаптевых. Среди ЖО преобладают биоморфозы по трубкам полихет. Общее содержание и распределение РЗЭ в ЖО складывается из соотношения рудного и нерудного вещества. Рудное вещество представлено в основном гидроксидами железа (лимонит). Оно сформировалось в ходе субокислительного диагенеза, усиленного процессами биотурбации, и определяет в ЖО некоторый избыток средних РЗЭ и дефицит церия ($Ce_{an} = 0.94$). Нерудное вещество поступает в ЖО из терригенных осадков и имеет (алюмо)силикатный состав. Оно определяет в ЖО содержание скандия и является источником зерен минералов РЗЭ, среди которых преобладает монацит-(Ce). Для осадков характерно общее подобие составу РЗЭ в сланцах и во взвеси р. Лена, впадающей в море Лаптевых, при небольшом избытке легких и средних РЗЭ и величине цериевой аномалии, практически равной единице ($Ce_{an} = 1.06$). В осадках минералы РЗЭ тяготеют к фракциям мельче 63 мкм. Высокое содержание в осадках органического вещества ($C_{org} = 2.15\%$), имеющего преимущественно терригенный генезис ($OB_{тер} = 85\%$), объясняет дефицит кислорода и общее вялое протекание процессов диагенетического минералообразования со слабым накоплением в ЖО микроэлементов, включая РЗЭ. Суммарное содержание РЗЭ в ЖО ниже, чем в осадках, и составляет в среднем 173 против 206 г/т.

Железистые образования, донные осадки, редкоземельные элементы, речной сток, диагенез, биотурбация, море Лаптевых

GEOCHEMISTRY AND MINERALOGY OF RARE-EARTH ELEMENTS IN FERRUGINOUS DEPOSITS AND BOTTOM SEDIMENTS OF THE LAPTEV SEA

O.N. Kolesnik, A.N. Kolesnik, A.S. Astakhov

The geochemical and mineralogical aspects of the distribution of rare-earth elements (REE) in ferruginous deposits (FD) and bottom sediments of the southeastern Laptev Sea are analyzed. The FD are dominated by biomorpha developed after polychaete tubes. The REE patterns depend on the proportion of ore and non-ore substances. The ore substance is represented mainly by iron hydroxides (limonite). It is a product of suboxic diagenesis enhanced by bioturbation and determines the slight enrichment of FD in MREE and cerium deficiency ($Ce_{an} = 0.94$). The non-ore substance comes from terrigenous sediments and has an (aluminosilicate) composition. It controls the scandium content and is the source of REE mineral grains, among which monazite-(Ce) prevails. The sediments demonstrate a common similarity in REE patterns to shales and suspended material transported to the Laptev Sea by the Lena River, with elevated LREE and MREE contents and the value of Ce anomaly almost equal to unity ($Ce_{an} = 1.06$). In the sediments, REE minerals occur mostly in the silt fraction (<63 μm in size). The high content of organic matter (C_{org} of up to 2.15%) of predominantly terrigenous origin ($OM_{тер}$ of up to 85%) in the sediments explains the oxygen deficiency and weak diagenetic mineral formation with low accumulation of trace elements, including REE, in the FD. The total REE content in the FD is lower than that in the sediments (on average, 173 ppm against 206 ppm).

Ferruginous deposits, bottom sediments, rare-earth elements, river runoff, diagenesis, bioturbation, Laptev Sea

ВВЕДЕНИЕ

Железомарганцевые образования (ЖМО) на дне океанического бассейна интересны по ряду причин. В первую очередь, это ресурсный потенциал на некоторые стратегически важные металлы, в частности медь, никель, кобальт [Hein et al., 2013]. Кроме того, изучение ЖМО способствует углублению знаний о рудогенезе как таковом и о более масштабных процессах, в рамках которых он реализуется, — седиментационном, постседиментационном, гидротермальном. Содержащиеся в кайнозойских осадочных разрезах конкреции и корки через послонные вариации состава фиксируют те изменения, которые происходили в окружающей среде во время их роста. Соответственно, предпринимаются попытки ис-

© Колесник О.Н., Колесник А.Н., Астахов А.С.

✉ e-mail: zeya1985.2008@mail.ru

пользовать ЖМО как индикатор палеоокеанографических условий и состава морских вод [Frank et al., 1999; Nielsen et al., 2009].

ЖМО арктических морей, в отличие от океанских, имеют подчиненное сырьевое значение [Каминский и др., 2014]. Являясь продуктом преимущественно диагенетического процесса — окислительного и субокислительного [Ingri, Pontér, 1987; Богданов и др., 1994; Hölemann et al., 1999; Стрекопытов, Дубинин, 2001; Колесник, Колесник, 2015; Vereshchagin et al., 2019], они приобретают особую ценность при расшифровке процессов постседиментационного перераспределения вещества. Одним из наиболее чутких индикаторов среды осадконакопления и тех трансформаций, которые происходят с осадками по мере их захоронения, являются редкоземельные элементы (РЗЭ) [Дубинин, 2006].

Главными факторами, определяющими тип раннего диагенеза в океане в целом и арктических морях в частности, являются количество и состав (реакционная способность) органического вещества, достигающего дна, микробиологическая активность и скорость накопления осадков (глубина проникновения кислорода) [Романкевич, Ветров, 2001; Kuzuk et al., 2017].

Цель настоящего исследования — выявить геохимические и минералогические особенности распределения РЗЭ в ЖМО моря Лаптевых и связать эти особенности с существующими в регионе условиями седиментации и диагенеза. Для этого планируется изучение вещественного состава не только ЖМО, но и вмещающих осадков, в том числе заключенного в них органического вещества. Работа является продолжением исследования, первые результаты которого изложены нами в кратком сообщении [Колесник и др., 2021]. Результаты первого этапа исследования позволили дополнить те весьма ограниченные сведения о РЗЭ в ЖМО моря Лаптевых, которые имелись на тот момент в научной литературе [Батурин, Дубинчук, 2011; Батурин, 2019].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материал. В результате геологического опробования дна юго-восточной части моря Лаптевых собрана коллекция из более чем ста образцов железистых образований (ЖО). Пробоотбор производился драгой и бокскорером на глубинах до 20 м в рамках второй российско-китайской арктической экспедиции Arctic Silk Way (83-й рейс НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2018 г.). Результативными оказались четыре станции. ЖО залегают на поверхности дна, частично или полностью погружаясь в осадок. Для исследования с каждой из четырех станций взято по пять типичных образцов ЖО и, где возможно, по одной пробе вмещающего осадка; для сравнения взята проба осадка со станции, где ЖО не обнаружены (рис. 1).

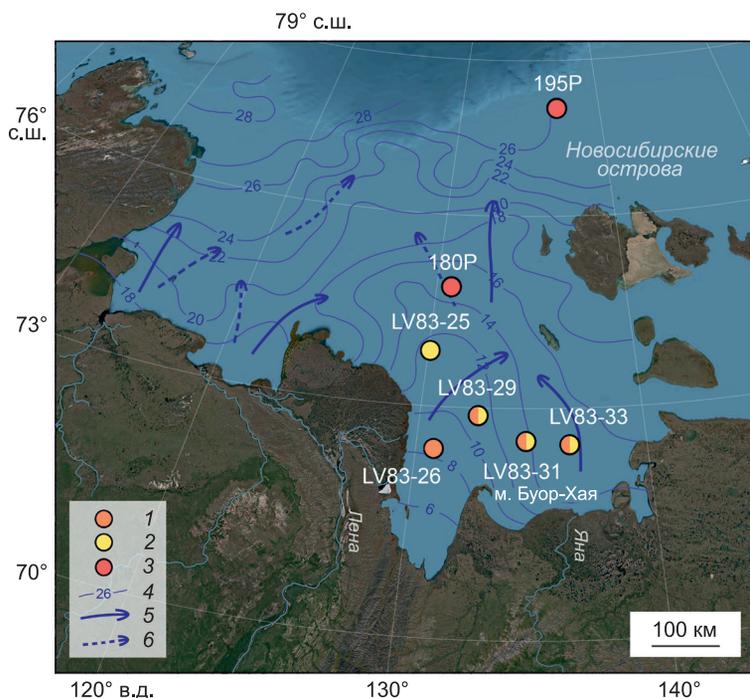
Анализы выполнялись в Аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН (Владивосток), Научно-исследовательском центре ГеоЛаб КФУ (Казань), научных лабораториях ТОИ ДВО РАН (Владивосток), Центре по изучению океана и климата ТОИ ДВО РАН (Владивосток) — ПИО МПР (Циндао) по стандартным методикам.

Разделение осадков на гранулометрические фракции выполнено на вибрационной просеивающей машине AS 200 control (Retsch, Германия) после удаления органического вещества.

Содержание органического углерода (C_{org}) и азота определено на элементном анализаторе Vario EL cube (Elementar, Германия) после удаления из проб карбонатной составляющей. Для контроля снимались стандарты Sulfanilamide и Aspartic Acid. Ошибка измерений для C_{org} не превышала 4 %, для азота — 5 %.

Рис. 1. Карта моря Лаптевых с указанием станций пробоотбора, солености, направления потоков опресненных вод с континента.

1, 2 — станции отбора железистых образований и, соответственно, донных осадков, в которых распределение редкоземельных элементов изучено в рамках настоящего исследования; 3 — станции отбора железомарганцевых образований, в которых содержание редкоземельных элементов определено ранее [Батурин, 2019]; 4 — изогалины, ‰; 5, 6 — основное и предполагаемое направление потоков опресненных вод [Abramova, Tuschling, 2005].



Анализ изотопного состава органического углерода ($\delta^{13}\text{C}$) выполнен на изотопном масс-спектрометре Delta V Plus (Thermo Fisher Scientific, Германия) с приставкой Flash HT после удаления из проб карбонатной составляющей. Для контроля снимались стандарты USGS-40 (L-глутаминовая кислота) и IAEA-CH-7 (полиэтиленовая пленка). Значения $\delta^{13}\text{C}$ получены относительно стандарта V-PDB. Среднеквадратическое отклонение варьировало в пределах 0.02—0.08 ‰ при заявленном отклонении прибора 0.06 ‰.

Содержание гумусовых веществ (ГВ) — гуминовых кислот (ГК) и фульвокислот (ФК) — проанализировано методом спектрофотометрии после щелочного экстрагирования проб [Ходоренко и др., 2012]. Ошибка измерений для этого метода составляет 2—5 %.

Потери при прокаливании (п.п.п.) и содержание кремния определены методом гравиметрии [Сочеванова, 1969; Химический анализ..., 1974], остальных макроэлементов и микроэлементов — методами атомно-эмиссионной и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометрах iCAP-6500 Duo (Thermo Electron Corporation, США) и Agilent 7500c (Agilent Technologies, США) после высушивания и кислотного разложения проб [Зарубина и др., 2014; Колесник, Колесник, 2015; Astakhov et al., 2019]. Для контроля качества анализировались стандартные образцы, в том числе рудная корка ГСО 5376-90 (ООПЕ 604), вулканогенно-терригенный ил ГСО 5369-90 (ООПЕ 201), морской осадок MAG-1. Для макроэлементов и большинства микроэлементов, включая РЗЭ, ошибка измерений не превышала 5 и 15 % соответственно.

Микростроение и локальный химический (минеральный) состав ЖО и осадков изучены с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 200 (FEI, Германия) с приставкой для элементного анализа и электронно-зондовых микроанализаторов JXA-8100 и JXA-8230 (JEOL, Япония) с волновыми и энергодисперсионными спектрометрами [Колесник, Колесник, 2015; Колесник и др., 2018]. Предварительно из ЖО изготавливались аншлифы; осадочное вещество наклеивалось на полоски электропроводящего скотча. Пробы напыляли тонким слоем углерода. При их анализе использовался невстроенный набор эталонов. Ошибка измерений составляла 10, 5 и 2 % при содержании элемента 1—5, 5—10 и более 10 мас. % соответственно. Предел обнаружения в зависимости от элемента варьировал от 0.04 до 0.10 мас. %.

Терминология. Обработка данных. В силу специфики исследования главное внимание уделялось получению и интерпретации данных о РЗЭ. В группе РЗЭ мы рассматривали лантан и лантаноиды от церия до лютеция (далее «лантаноиды»), а также близкие им по свойствам скандий и иттрий. При расчете суммарного содержания РЗЭ ($\Sigma\text{РЗЭ}$) учитывались только лантаноиды. Под легкими РЗЭ (ЛРЗЭ) понимались лантан, церий, празеодим и неодим, под тяжелыми (ТРЗЭ) — эрбий, тулий, иттербий и лютеций. Средние РЗЭ (СРЗЭ) — элементы, расположенные в таблице Менделеева между легкими и тяжелыми РЗЭ.

Составы РЗЭ в ЖО и осадках нормализовались на соответствующий состав постаршейского австралийского глинистого сланца PAAS [McLennan, 1989]. Значения аномалий церия и европия, а также отношения ЛРЗЭ/ТРЗЭ рассчитывались по формулам: $\text{Ce}_{\text{ан}} = \text{Ce}_{\text{норм}} / (0.5\text{La}_{\text{норм}} + 0.5\text{Pr}_{\text{норм}})$, $\text{Eu}_{\text{ан}} = \text{Eu}_{\text{норм}} / (0.5\text{Sm}_{\text{норм}} + 0.5\text{Gd}_{\text{норм}})$, $\text{ЛРЗЭ/ТРЗЭ} = (\text{La}_{\text{норм}} + 2\text{Pr}_{\text{норм}} + \text{Nd}_{\text{норм}}) / (\text{Er}_{\text{норм}} + \text{Tm}_{\text{норм}} + \text{Yb}_{\text{норм}} + \text{Lu}_{\text{норм}})$, где «норм» означает отношение содержания элемента в образце к его содержанию в сланце.

Количество терригенного органического вещества в осадках оценивалось по весовому соотношению C/N и изотопному составу органического углерода $\delta^{13}\text{C}$: $\text{ОВ}_{\text{тер}} (\%) = 100 \times (\delta^{13}\text{C}_{\text{обр}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{мор}}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{тер}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{мор}})$, где $\delta^{13}\text{C}_{\text{мор}} = -21$ ‰, $\delta^{13}\text{C}_{\text{тер}} = -27$ ‰ [Walsh et al., 1989]; «реперные» значения $\text{C/N}_{\text{мор}} = 6$, $\text{C/N}_{\text{тер}} = 13.1$ [Ветров и др., 2008].

Частота встречаемости минералов РЗЭ оценивалась на полуколичественном уровне по отношению количества минералов РЗЭ, которые удалось обнаружить на поверхности пробы с помощью растрового электронного микроскопа или электронно-зондового микроанализатора, к площади этой пробы [Колесник и др., 2018]. Результаты представлялись в пересчете на площадь, равную 1 см².

Для определения степени подвижности, проявляемой химическими элементами при формировании ЖО, использовался коэффициент относительной концентрации (КК) — отношение содержания элемента в конкреционных образованиях к его содержанию во вмещающей породе [Геологический словарь, 1973].

Генетические построения по данным о содержании в ЖО РЗЭ выполнены с использованием диаграмм М. Бау [Bau et al., 2014] в программе Grapher 12.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Железистые образования. Общая характеристика. Строение и форма ЖО относительно однообразны и вместе с тем специфичны для арктических морей (рис. 2, в—е). Преобладают биоморфозы по трубкам червей-илоедов (полихет) желто-бурого, сероватого цвета. Встречаются корочки желто-бурого цвета, внутренняя сторона которых покрыта черным налетом. Более подробное описание образцов сделано ранее [Колесник и др., 2021].

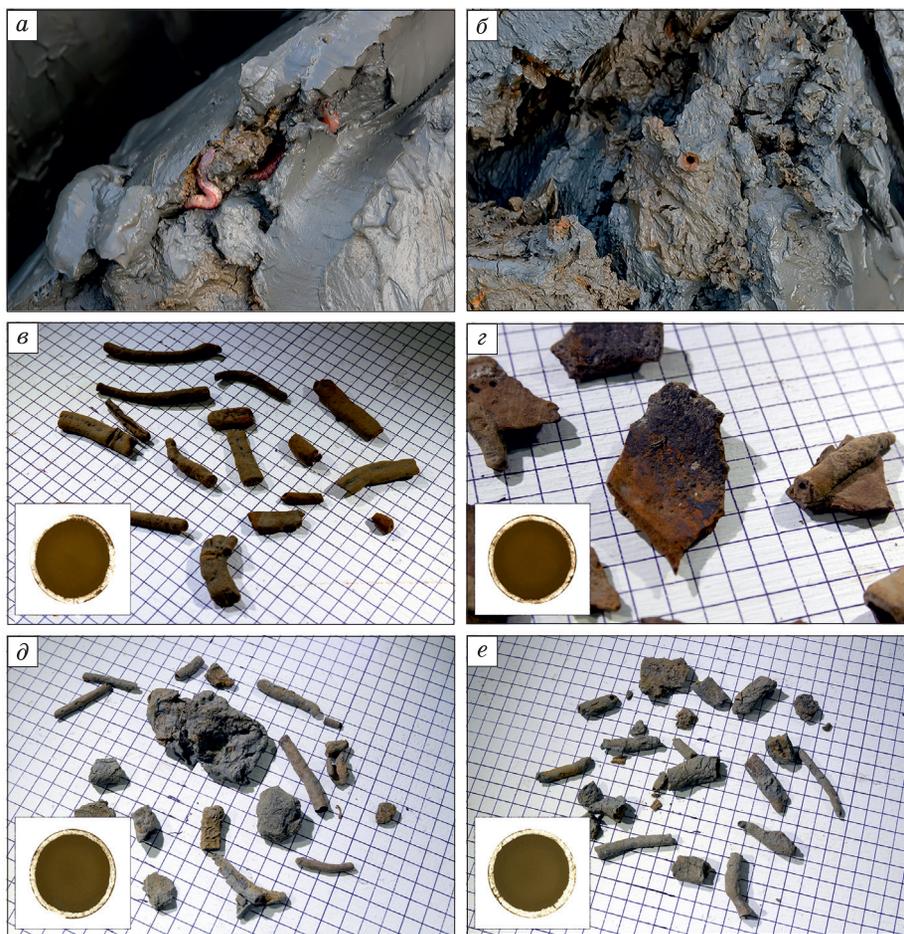


Рис. 2. Фотографии железистых образований и донных осадков юго-восточной части моря Лаптевых.

a, б — донные осадки с морскими червями и их ходами; *в—е* — железистые образования в ненарушенном виде и в прессованном порошке со станций LV83-26, LV83-29, LV83-31 и LV83-33 соответственно. Калибровочная сетка — 5 × 5 мм.

Минеральный состав. На микроуровне хорошо видно, что все ЖО, в сущности, представляют собой пропитанный рудным веществом осадок (рис. 3, *a*; табл. 1, ан. 1, 2). Сильнее всего пропитка видна в осадке со ст. LV83-29, слабее всего — со ст. LV83-33. Еще на первом этапе исследования установлено, что в рудной части ЖО постоянно присутствует гетит, иногда с лепидокрокитом (лимонит); черный налет — это вернадит [Колесник и др., 2021]. Минеральный состав нерудной части ЖО соответствует составу донных осадков и включает полевые шпаты, кварц, слюды, глинистые минералы.

Органическое вещество. ЖО содержат 1.46—2.63 % $C_{орг}$ (в среднем 1.91 %) и 0.11—0.20 % азота (в среднем 0.15 %) (табл. 2). Значение C/N варьирует в пределах 9—18 (в среднем 14). Содержание гумусовых веществ составляет 0.7—1.7 % (в среднем 1.2 %), при этом основной вклад в содержание вносят фульвокислоты (ФК/ГК — от 5 до 9).

Химический состав. ЖО содержат 9.43—20.4 % железа (в среднем 14.6 %) и 0.09—0.33 % марганца (в среднем 0.18 %) (табл. 3). Значения модуля Mn/Fe не превышают 0.02. На долю фосфора приходится 0.47—0.96 % (в среднем 0.71 %). Все образцы содержат большое количество кремния (18.0—26.7 %, в среднем 22.1 %) и алюминия (5.68—7.20 %, в среднем 6.53 %). Далее идут щелочные и щелочноземельные элементы (средние значения): натрий — 1.91, калий — 1.89, магний — 1.10, кальций — 0.78 %. Содержание титана не превышает 0.21 %. Потери при прокаливании составляют 7.30—10.1 % при среднем значении 9.1 %.

Суммарное содержание основных малых рудных элементов низкое: $\Sigma(\text{Co, Ni, Cu})$ — 65—93 г/т при среднем значении 77 г/т (см. табл. 3). Содержание на уровне сотен граммов на тонну характерно для трех микроэлементов (средние значения): барий — 478, стронций — 282, мышьяк — 275 г/т. В отдель-

Таблица 1. Химический состав аутигенных выделений железа и марганца, основных терригенных компонентов и минералов редкоземельных элементов в железистых образованиях (1—3) и донных осадках (4—19) юго-восточной части моря Лаптевых, мас. %

Элемент	Номер анализа																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
O	34.17	41.62	22.75	47.43	52.92	42.56	37.12	27.74	49.61	24.85	46.34	39.47	52.14	35.82	59.20	16.75	42.65	43.22	46.21
F	—	—	—	—	—	—	—	0.37	—	—	—	0.51	—	0.90	—	0.15	—	—	—
Na	1.35	2.55	—	—	—	0.95	2.49	—	9.14	—	—	—	0.83	0.64	—	0.89	0.85	—	—
Mg	1.28	0.85	—	1.19	—	1.43	0.75	—	—	—	4.86	—	1.37	—	—	0.70	0.72	—	—
Al	7.30	8.22	—	—	—	4.43	15.16	—	10.74	2.65	8.68	0.66	11.04	2.18	—	6.59	4.88	3.44	1.69
Si	14.76	23.52	0.62	2.16	47.11	11.00	33.03	1.56	31.01	3.36	23.29	1.88	21.27	12.32	41.14	13.08	45.31	29.14	52.20
P	1.07	0.73	13.09	5.95	—	—	—	11.66	—	10.98	—	8.97	—	8.75	—	2.64	—	1.07	—
S	—	—	—	—	—	0.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cl	1.52	1.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
K	3.04	1.62	—	—	—	1.28	5.82	0.13	—	—	—	0.09	3.15	0.48	—	1.41	1.43	1.41	—
Ca	0.55	0.55	—	4.22	—	1.48	—	—	—	—	—	0.21	1.88	2.54	—	0.36	—	—	—
Ti	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.58	—	2.44	—	—	—	—	—
Mn	1.10	3.36	—	—	—	21.48	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fe	24.46	14.37	1.33	31.47	—	4.98	2.84	—	—	—	13.10	0.42	3.75	1.61	—	2.10	3.14	2.77	—
Y	—	—	—	—	—	—	—	—	—	32.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—
La	—	—	18.33	—	—	—	—	15.10	—	—	—	7.97	—	5.71	—	10.84	—	2.67	—
Ce	—	—	27.80	—	—	—	—	24.38	—	—	—	15.46	—	11.97	—	19.91	—	5.70	—
Pr	—	—	1.81	—	—	—	—	2.19	—	—	—	—	—	1.13	—	2.40	—	1.19	—
Nd	—	—	5.95	—	—	—	—	8.00	—	—	—	5.98	—	4.68	—	9.92	—	3.45	—
Sm	—	—	0.96	—	—	—	—	0.50	—	—	—	—	—	0.67	—	—	—	—	—
Eu	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gd	—	—	—	—	—	—	—	0.51	—	2.60	—	—	—	0.38	—	1.32	—	—	—
Tb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dy	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6.35	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ho	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Er	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4.09	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Yb	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Th	—	—	1.52	—	—	—	—	1.42	—	0.42	—	2.84	—	—	—	1.63	—	—	—
U	—	—	—	—	—	—	—	0.21	—	0.47	—	—	—	—	—	0.42	—	—	—
Сумма	90.60	98.41	94.15	92.43	100.03	89.95	97.21	93.76	100.50	90.44	96.28	91.02	95.44	92.23	100.34	91.12	98.98	94.06	100.10

Примечание. Расположение проанализированных точек 1—9 с комментариями — см. рис. 3. Точки 10, 11 — ксенолит и граничащий с ним хлорит; 12, 13 — минеральная фаза РЗЭ с фосфором, титаном, кислородом, примесью тория и граничащий с ней алюмосиликат железа и калия; 14, 15 — фосфосиликат РЗЭ и граничащий с ним кварц; 16, 17 — алюмосиликат РЗЭ с фосфором, торием, ураном и граничащий с ним алюмосиликат железа; 18, 19 — силикат РЗЭ и граничащий с ним кварц. Прочерк — элемент не обнаружен. Отклонения в сумме от 100 % объясняются спецификой анализа и самого анализируемого материала [Колесник и др., 2018].

ных пробах такого уровня значений достигают еще цинк и ванадий. Остальные микроэлементы, в том числе РЗЭ, содержатся в ЖО в меньших количествах.

Редкоземельные элементы. Собственных минералов иттрия и скандия выявить не удалось. Примесь этих элементов в каких-либо других минералах тоже не зафиксирована. Единичное мелкое зерно монацита-(Се) с примесью тория диагностировано в нерудном веществе алюмосиликатного состава (см. рис. 3, а; табл. 1, ан. 3). Очевидно, основная форма нахождения РЗЭ в ЖО — рассеянная.

Содержание скандия в ЖО — 7.14—12.0 г/т (в среднем 10.2 г/т), иттрия — 15.0—29.5 г/т (в среднем 20.6 г/т), лантаноидов — 150—208 г/т (в среднем 173 г/т) (табл. 4). Самый распространенный лан-

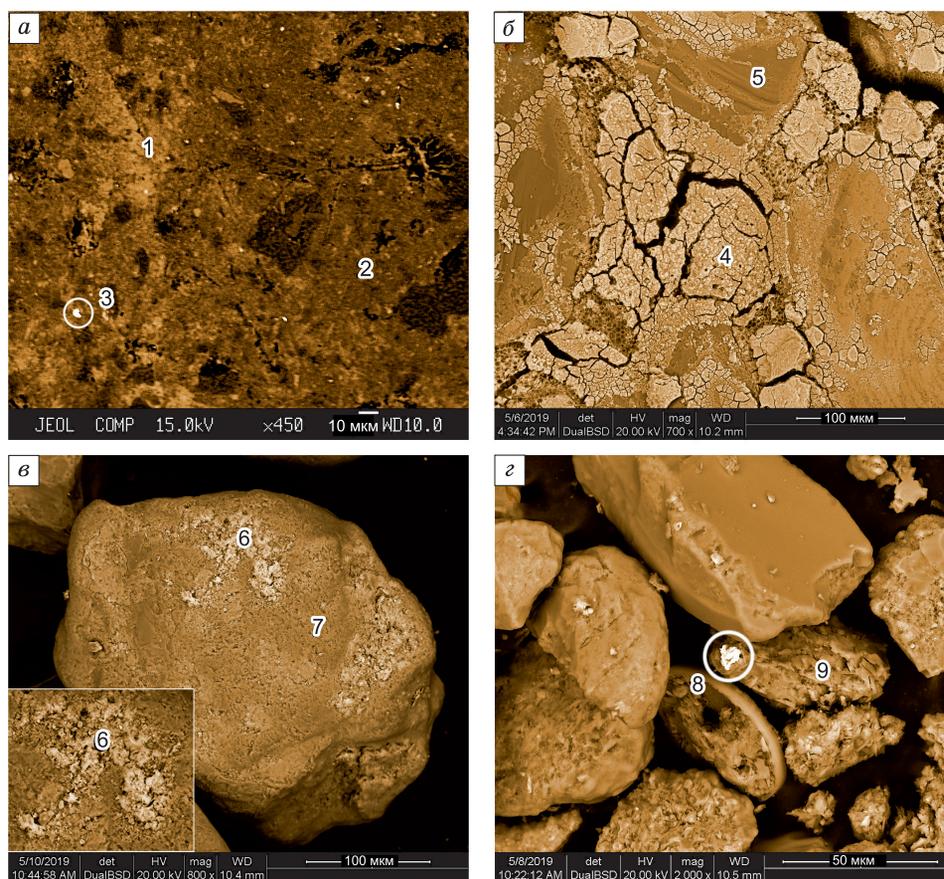


Рис. 3. Микрофотографии железистых образований и донных осадков юго-восточной части моря Лаптевых в режиме отраженных электронов.

а — пропитанное гидроксидами железа (1) вещество алюмосиликатного состава (2) с зерном монацита-(Ce) (3) в составе железистого образования; *б* — предположительно железокальциевые гидроксофосфаты (4) вдоль трещин в кварце (5) в составе осадка; *в* — выделения гидроксидов марганца и железа (6) на поверхности существенно калиевого алюмосиликата (7) в составе осадка; *г* — зерно монацита-(Ce) (8) в сростании с натриевым алюмосиликатом (9) в составе осадка. Химический состав точек 1—9 приведен в соответствующих столбцах табл. 1.

танойд и РЗЭ в целом — церий. В суммарном содержании РЗЭ на его долю приходится не менее 38 %. Легкие РЗЭ преобладают над тяжелыми, максимальное значение ЛРЗЭ/ТРЗЭ составляет 1.48. Состав лантаноидов в нормализованном виде представлен на рис. 4, *а*. Основная специфика заключается в некотором дефиците церия и обогащении средними РЗЭ с пиком в области европия, самария либо гадолиния. Средние значения $Se_{ан}$, $Eu_{ан}$ составляют соответственно 0.94 и 1.05.

Генетическая типизация по содержанию РЗЭ показала, что изученные ЖО сформировались в ходе диагенеза (рис. 5), однако расположение в пограничной зоне соответствующего поля и даже выход за его пределы свидетельствуют о некоторой специфичности процесса.

Донные осадки. *Общая характеристика.* Поверхностные осадки юго-западной части моря Лаптевых, в том числе вмещающие ЖО, полужидкие, мягкие, серого цвета с редкими коричневыми разводами и следами биотурбации (см. рис. 2, *а, б*); представляют собой алевроитопелитовые илы с примесью песка и органических остатков (табл. 5).

Минеральный состав. В осадках постоянно присутствуют калиево-натриевые полевые шпаты, плагиоклазы, кварц, слюды и глинистые минералы, иногда плохой сохранности, со следами изменений (см. рис. 3, *б—г*; табл. 1). Кроме ординарных породообразующих и аксессуарных обломочных минералов, в крупных фракциях 500—1000 и 125—250 мкм обнаружены аутигенные фазы железа с фосфором и кальцием (железокальциевые гидроксофосфаты?) в виде налета на зернах минералов-хозяев, а также существенно марганцевые пленки (см. рис. 3, *б, в*; табл. 1, ан. 4, 6).

Органическое вещество. Осадки содержат 1.31—2.15 % $C_{орг}$ (в среднем 1.86 %) и 0.14—0.22 % азота (в среднем 0.18 %) (см. табл. 2). Значения C/N варьируют в пределах 9—12 (в среднем 10). Со-

Таблица 2. Содержание и состав органического вещества в железистых образованиях и донных осадках юго-восточной части моря Лаптевых

Компонент, показатель	Железистые образования				Донные осадки			
	LV83-26, n = 1	LV83-29, n = 1	LV83-31, n = 1	LV83-33, n = 1	LV83-25, n = 1	LV83-29, n = 1	LV83-31, n = 1	LV83-33, n = 1
C _{орг} , %	2.63	1.75	1.80	1.46	2.08	2.15	1.90	1.31
N	0.15	0.11	0.20	0.12	0.22	0.18	0.18	0.14
ГК	0.2	0.2	0.1	0.1	—	0.1	0.1	0.1
ФК	1.5	1.3	0.8	0.6	—	0.4	0.4	0.3
ГВ	1.7	1.4	0.9	0.7	—	0.5	0.6	0.4
C/N	18	16	9	12	9	12	11	9
ФК/ГК	7	9	5	6	—	5	4	4
δ ¹³ C, ‰	—	—	—	—	-26.1	-25.9	-26.0	-26.1
OB _{терр} , %	—	—	—	—	84	82	83	85

Примечание. Прочерк — не проанализировано, нет данных для расчета.

держание гумусовых веществ в составе C_{орг} по результатам анализа трех проб составляет 0.5, 0.6 и 0.4 %, при этом основной вклад в содержание вносят фульвокислоты (ФК/ГК — 5, 4, 4).

Химический состав осадков (и тех, которые вмещают ЖО, и тех, которые их не содержат) видных различий не имеет. Наиболее весомый вклад вносят кремний (25.7—28.6 %, в среднем 27.0 %) и алюминий (7.77—8.55 %, в среднем 8.11 %) (табл. 3). На третьем месте железо (4.08—5.13%, в среднем

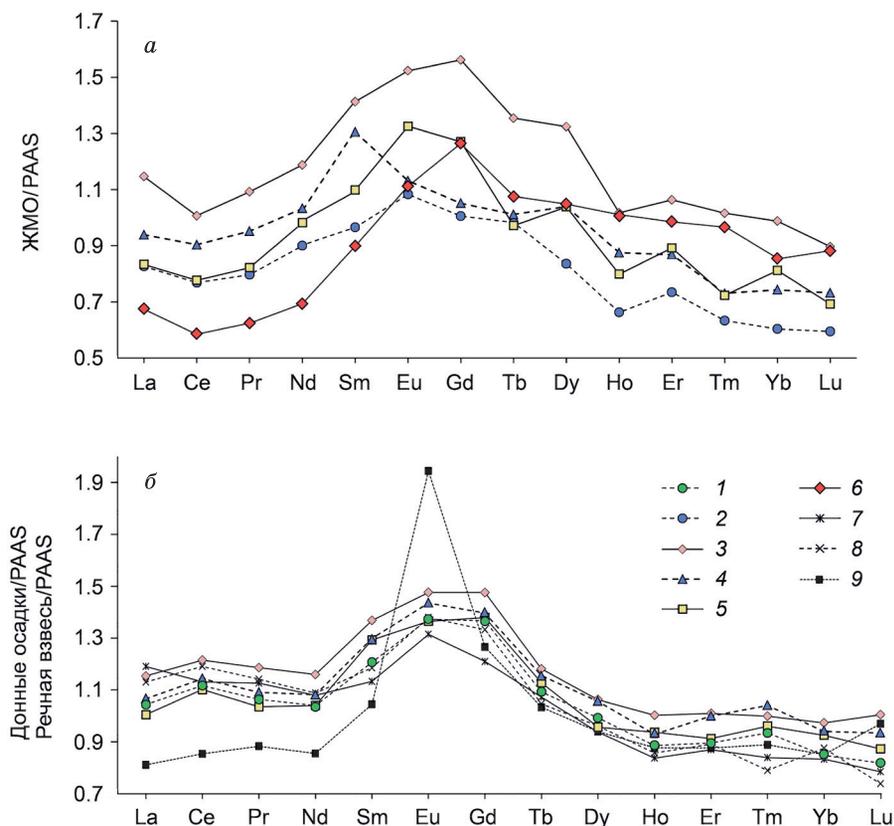


Рис. 4. Средний PAAS-нормализованный состав редкоземельных элементов железистых и железомарганцевых образований моря Лаптевых, а также донных осадков моря Лаптевых и взвеси рек Лена и Яна.

1—5 — железистые образования и осадки, наши данные: 1 — ст. LV83-25, 2 — ст. LV83-26, 3 — ст. LV83-29, 4 — ст. LV83-31, 5 — ст. LV83-33; б — железомарганцевые образования [Батурич, 2019]; 7 — осадки моря Лаптевых в целом [Астахов и др., 2018]; 8, 9 — взвесь рек Лена и Яна соответственно [Rachold, 1999].

Таблица 3.

**Химический состав железистых образований и донных осадков
юго-восточной части моря Лаптевых**

Элемент, показатель	Железистые образования												Донные осадки			
	LV83-26, n = 5			LV83-29, n = 5			LV83-31, n = 5			LV83-33, n = 5			LV83-25, n = 1	LV83-29, n = 1	LV83-31, n = 1	LV83-33, n = 1
	x_{cp}	x_{min}	x_{max}	x_{cp}	x_{min}	x_{max}	x_{cp}	x_{min}	x_{max}	x_{cp}	x_{min}	x_{max}				
Fe, %	15.7	15.5	16.0	20.3	20.2	20.4	12.9	12.8	13.0	9.49	9.43	9.54	4.44	4.86	5.13	4.08
Mn	0.17	0.16	0.19	0.30	0.28	0.33	0.14	0.10	0.17	0.12	0.09	0.15	0.22	0.35	0.24	0.11
Mn/Fe	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.05	0.07	0.05	0.03
P	0.89	0.87	0.92	0.92	0.86	0.96	0.52	0.50	0.56	0.50	0.47	0.52	0.10	0.12	0.11	0.09
Si	21.6	21.0	21.9	18.4	18.0	19.0	22.5	22.0	23.0	26.0	25.4	26.7	26.9	27.0	25.7	28.6
Al	6.08	6.00	6.16	5.84	5.68	6.04	7.03	6.98	7.11	7.16	7.11	7.20	7.77	8.20	8.55	7.90
K	1.78	1.74	1.83	1.72	1.69	1.75	2.03	2.00	2.06	2.02	1.99	2.07	2.42	2.49	2.56	2.37
Na	1.68	1.61	1.71	1.75	1.73	1.80	2.29	2.26	2.31	1.93	1.88	2.01	2.91	2.41	2.75	2.62
Ca	1.05	1.01	1.09	0.80	0.75	0.88	0.59	0.55	0.63	0.68	0.66	0.70	0.74	0.69	0.52	0.54
Mg	1.06	1.04	1.10	1.11	1.07	1.14	1.18	1.14	1.21	1.06	1.03	1.10	1.25	1.27	1.30	1.00
Ti	0.17	0.14	0.21	0.14	0.11	0.17	0.16	0.14	0.19	0.16	0.13	0.19	0.33	0.36	0.36	0.36
П.п.п.	9.26	9.23	9.30	10.0	9.89	10.1	9.72	9.61	9.81	7.34	7.30	7.41	10.0	8.85	10.3	7.91
Li, г/т	30.0	28.3	32.4	34.5	33.6	35.0	40.7	39.6	42.0	40.5	39.9	41.1	51.2	57.5	64.6	103
Be	1.63	1.42	1.74	1.65	1.49	1.73	2.30	2.00	2.67	1.90	1.84	2.01	2.27	2.73	2.74	2.39
V	73.9	71.9	75.8	115	111	117	116	115	117	108	107	109	143	148	158	138
Cr	43.1	39.9	45.2	52.5	50.0	55.1	62.6	60.0	65.9	54.5	52.6	55.7	68.1	72.6	91.8	69.0
Co	16.7	15.0	18.1	24.2	23.0	25.9	23.9	22.6	25.6	15.8	15.0	16.6	16.8	19.2	19.1	16.4
Ni	32.6	31.2	35.0	35.7	34.0	37.0	38.9	38.0	40.0	30.8	30.3	31.5	32.8	36.1	41.7	46.4
Cu	21.9	20.1	23.4	21.7	20.7	23.3	28.6	28.0	29.3	18.9	18.8	19.0	19.1	22.5	22.5	18.5
Zn	58.3	57.5	59.0	105	103	106	108	107	110	75.5	74.6	76.0	88.6	101	109	89.7
Ga	13.3	13.0	14.2	14.6	13.6	15.9	14.9	14.0	16.0	16.6	16.2	17.0	19.1	20.7	21.9	19.5
As	248	235	257	545	527	567	178	177	180	130	129	130	27.1	30.5	29.1	20.6
Rb	69.9	68.8	71.0	82.8	81.0	84.5	96.8	95.3	98.9	88.2	86.9	89.7	114	121	130	115
Sr	336	330	341	305	302	308	230	227	234	257	256	258	208	198	172	187
Zr	48.6	47.2	51.1	49.2	48.0	51.1	58.8	58.0	59.7	55.1	54.4	56.2	120	130	137	133
Nb	4.69	4.38	5.07	4.11	3.34	4.93	4.29	3.74	5.01	4.26	3.69	5.00	11.0	11.9	11.5	11.7
Mo	17.9	16.7	19.3	48.7	47.6	49.3	20.2	18.2	22.1	5.84	5.63	6.01	4.79	7.78	5.59	2.72
Sn	1.63	1.55	1.78	1.26	1.11	1.37	2.77	2.57	2.98	1.52	1.40	1.66	1.98	2.27	2.30	2.29
Sb	0.97	0.87	1.09	2.10	1.89	2.34	1.07	0.86	1.23	1.47	1.42	1.53	0.85	1.04	1.03	0.99
Cs	3.63	3.43	4.02	5.04	4.39	5.97	5.94	5.88	6.03	5.79	5.64	5.99	5.41	6.01	7.00	5.93
Ba	497	491	505	434	428	441	475	175	773	506	505	507	552	552	536	552
Hf	1.58	1.43	1.70	1.55	1.39	1.67	1.70	1.52	1.88	1.92	1.89	1.96	2.89	3.16	3.30	3.40
Ta	0.39	0.36	0.42	0.32	0.15	0.44	0.29	0.22	0.36	0.27	0.22	0.31	0.77	0.80	0.81	0.81
W	1.28	1.21	1.33	1.93	1.83	2.08	1.68	1.59	1.77	1.04	1.01	1.07	1.22	1.49	1.44	1.28
Tl	0.77	0.63	0.89	0.75	0.67	0.89	0.94	0.84	1.08	0.68	0.64	0.73	0.49	0.57	0.56	0.51
Pb	20.1	19.3	21.0	30.1	29.2	31.1	28.9	28.6	29.1	22.9	22.9	23.0	25.1	28.3	28.7	24.3
Th	7.48	7.17	8.01	8.76	8.34	9.01	9.5	9.11	10.0	8.17	7.37	9.01	12.8	14.3	14.0	12.6
U	2.96	2.81	3.07	5.69	5.25	6.13	4.33	3.17	5.24	2.33	2.23	2.39	2.39	2.60	2.76	2.59

4.63 %). Далее следуют щелочные и щелочноземельные элементы (средние значения): натрий — 2.67 %, калий — 2.46 %, магний — 1.21 %, кальций — 0.62 %. Содержание титана, марганца и фосфора низкое, десятые доли процента. Значения Mn/Fe колеблются в пределах 0.03—0.07 (в среднем 0.05) и превышают таковые для ЖО. Потери при прокаливании в осадках составляют 7.91—10.3 %, что сравнимо со значениями, полученными для ЖО.

Содержание $\Sigma(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu})$ находится примерно на том же уровне, что и в ЖО, — 69—83 г/т при среднем значении 78 г/т (см. табл. 3). Содержание на уровне сотен граммов на тонну во всех пробах демонстрируют только пять элементов (средние значения): барий — 548 г/т, стронций — 191 г/т, вана-

Таблица 4. Содержание редкоземельных элементов в железистых образованиях и донных осадках юго-восточной части моря Лаптевых

Элемент, показатель	Железистые образования												Донные осадки			
	LV83-26, n = 5			LV83-29, n = 5			LV83-31, n = 5			LV83-33, n = 5			LV83-25, n = 1	LV83-29, n = 1	LV83-31, n = 1	LV83-33, n = 1
	x _{ср}	x _{min}	x _{max}	x _{ср}	x _{min}	x _{max}	x _{ср}	x _{min}	x _{max}	x _{ср}	x _{min}	x _{max}				
Sc, г/т	8.39	7.14	9.42	10.4	9.98	11.0	10.0	8.16	11.6	11.8	11.7	12.0	13.4	14.4	15.5	13.5
Y	15.9	15.0	16.7	27.8	26.6	29.5	19.6	19.0	20.3	19.2	19.0	19.5	24.2	26.7	27.8	25.3
La	31.6	31.0	32.2	43.8	41.0	46.6	35.9	35.0	36.7	31.8	31.6	32.1	39.9	44.1	40.7	38.4
Ce	61.1	60.2	62.8	80.1	78.0	82.0	71.9	71.1	73.0	61.8	60.9	62.3	88.9	96.8	91.0	87.7
Pr	7.03	6.82	7.37	9.6	8.88	10.4	8.4	7.41	10.0	7.26	7.14	7.33	9.39	10.5	9.64	9.14
Nd	30.5	30.0	31.4	40.3	38.3	42.0	35.0	33.8	36.3	33.8	31.9	34.0	35.3	39.3	36.7	35.3
Sm	5.36	5.07	5.81	7.84	6.65	8.89	7.24	6.80	8.00	6.10	5.94	6.22	6.70	7.59	7.21	7.18
Eu	1.17	1.09	1.28	1.65	1.45	2.01	1.22	1.13	1.34	1.43	1.35	1.55	1.48	1.59	1.55	1.47
Gd	4.69	4.33	4.96	7.28	6.79	8.01	4.90	4.79	5.13	5.92	5.76	6.05	6.37	6.88	6.51	6.43
Tb	0.76	0.69	0.88	1.05	0.93	1.27	0.78	0.66	0.93	0.75	0.70	0.83	0.85	0.91	0.89	0.87
Dy	3.91	3.81	4.02	6.20	5.65	6.84	4.86	4.12	5.74	4.86	4.60	5.14	4.65	4.97	4.94	4.48
Ho	0.66	0.61	0.72	1.01	0.76	1.37	0.87	0.81	0.94	0.79	0.73	0.84	0.88	0.99	0.92	0.93
Er	2.09	2.01	2.27	3.03	2.21	3.88	2.47	2.14	2.98	2.54	2.50	2.61	2.55	2.88	2.85	2.60
Tm	0.26	0.21	0.31	0.41	0.29	0.55	0.30	0.24	0.37	0.29	0.26	0.31	0.38	0.40	0.42	0.39
Yb	1.70	1.53	1.93	2.79	2.61	3.03	2.10	1.53	2.57	2.29	2.26	2.34	2.39	2.75	2.65	2.61
Lu	0.26	0.21	0.33	0.39	0.36	0.43	0.32	0.26	0.37	0.30	0.27	0.34	0.35	0.44	0.40	0.38
ΣРЗЭ	151	150	153	205	204	208	176	174	178	159	159	160	200	220	206	198
ЛРЗЭ/ТРЗЭ	1.29	1.19	1.48	1.14	1.10	1.21	1.26	1.20	1.31	1.11	1.01	1.17	1.20	1.18	1.11	1.12
Се _{ан}	0.95	0.83	1.10	0.90	0.84	1.01	0.96	0.91	0.99	0.94	0.91	0.98	1.06	1.04	1.06	1.08
Eu _{ан}	1.10	1.02	1.16	1.02	0.89	1.24	0.96	0.89	0.99	1.12	1.09	1.13	1.07	1.04	1.07	1.02

дий — 147 г/т, цирконий — 130 г/т, рубидий — 120 г/т, в отдельных пробах — еще цинк и литий. Содержание остальных микроэлементов — десятки граммов на тонну и ниже.

Редкоземельные элементы. Минералы РЗЭ встречаются редко, главным образом во фракциях < 32 и 32—63 мкм (см. рис. 3, г; табл. 1, ан. 8, 10, 12, 14, 16, 18; табл. 5), и относятся к аксессуарным минералам. Форма выделения — отдельные зерна разных конфигураций и вкрапления в породообразующих минералах (последнее характерно для фракций крупнее 63 мкм). Размер выделений, как правило, не превышает 5 мкм. Почти 80 % обнаруженных зерен — монацит на основе легких РЗЭ с преобладанием церия, примесью тория, урана. Находки других минералов легких РЗЭ единичны. Из главных элементов в этих минералах, кроме легких РЗЭ и фосфора, отмечаются кремний, алюминий, кальций, титан, железо. Единственный обнаруженный минерал иттрия — ксенотим с тяжелыми РЗЭ, торием, ураном; среди тяжелых РЗЭ доминирует диспрозий. Скандий собственными минералами не представлен. Примесь этого элемента в других минералах тоже не зафиксирована.

Содержание скандия — 13.4—15.5 г/т при среднем значении 14.2 г/т, иттрия — 24.2—27.8 г/т при среднем значении 26.0 г/т, лантаноидов — 198—220 г/т при среднем значении 206 г/т (см. табл. 4). Как и в ЖО, в осадках самым распространенным лантаноидом и РЗЭ в целом является церий (не менее 44 % от ΣРЗЭ). Отмечается некоторое преобладание легких РЗЭ над тяжелыми. Максимальное значение ЛРЗЭ/ТРЗЭ составляет 1.20. Нормализованные спектры распределения лантаноидов в общем демонстрируют обогащение легкими и средними РЗЭ с небольшими максимумами церия и европия (см. рис. 4, б). Средние значения Се_{ан} и Eu_{ан} — 1.06 и 1.05 соответственно.

Поведение элементов в процессе диагенетического минералообразования. Значения коэффициента концентрации (КК) указывают на то, что формирование ЖО в районе исследования сопровождается слабым накоплением химических элементов. Из числа макроэлементов только фосфор и железо проявляют отчетливое аккумулятивное поведение (КК: 4.49—8.25 и 2.31—4.20 соответственно; табл. 6). Из группы РЗЭ среднее значение КК > 1 по всем станциям имеет только диспрозий. Для большинства РЗЭ значения КК находятся в пределах 0.82—0.97, хотя в отдельных пробах, главным образом со ст. LV83-29, значения могут быть несколько выше единицы. У церия и скандия средние значения КК еще ниже: в среднем 0.77 и 0.75 соответственно. Из остальных микроэлементов сравнительно активно накапливаются только мышьяк и молибден (КК: 6.08—18.60, 2.07—6.34 соответственно; см. табл. 6).

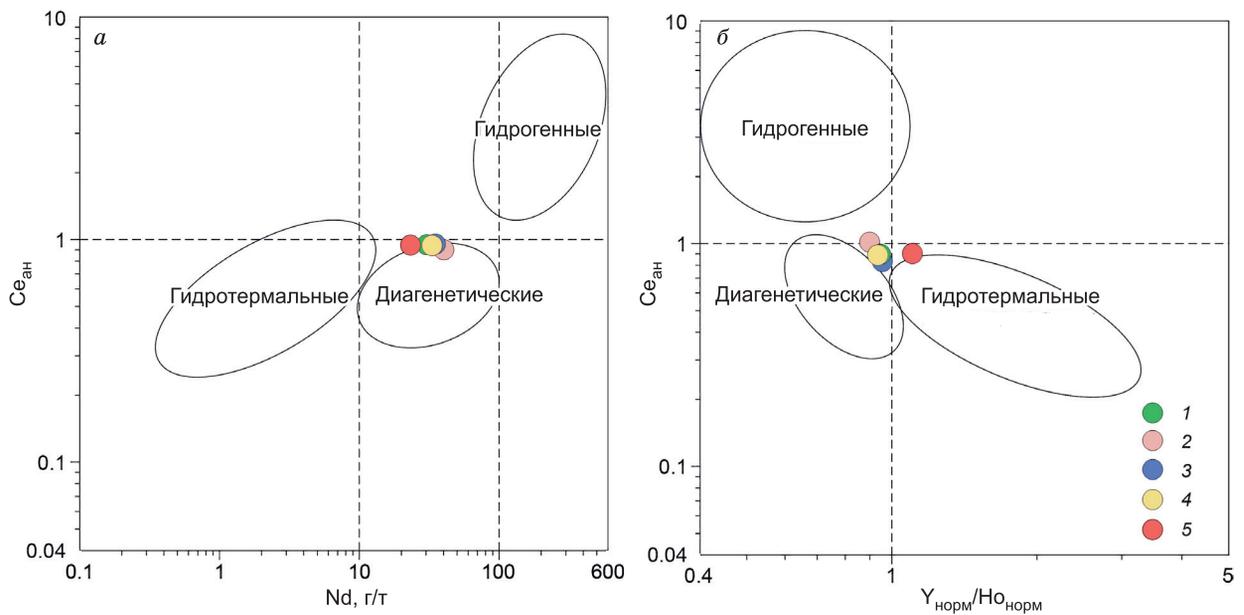


Рис. 5. Положение железистых и железомарганцевых образований моря Лаптевых относительно полей железомарганцевых образований океана, различных по генезису, содержанию и распределению редкоземельных элементов.

a, б — диаграммы зависимости цериевой аномалии от концентрации неодима и иттриевой аномалии соответственно, по [Bau et al., 2014]. 1–4 — наши данные: 1 — ст. LV83-26, 2 — ст. LV83-29, 3 — ст. LV83-31, 4 — ст. LV83-33; 5 — [Батурин, 2019].

Наиболее высокие средние значения КК для железа, фосфора, РЗЭ и большинства малых рудных элементов зафиксированы в ЖМО со ст. LV83-29.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенное нами исследование показало, что содержание органического вещества в осадках и ЖО юго-восточной части моря Лаптевых, выраженное через содержание $C_{орг}$, составляет первые проценты (см. табл. 2) и оценивается как высокое [Кошелева, Яшин, 1999; Романкевич, Ветров, 2001; The Organic Carbon..., 2004]. Осадки имеют смешанное терригенно-морское происхождение с резким преобладанием терригенной составляющей. Об этом свидетельствуют результаты расчетов на основе содержания органического углерода и азота (C/N) и изотопного состава органического углерода ($\delta^{13}C$). По

Таблица 5. Распределение редкоземельных элементов в размерных фракциях донных осадков станции LV83-25

Показатель	Гранулометрические фракции, мкм						
	< 32	32–63	63–125	125–250	250–500*	500–1000**	> 1000***
Доля фракции, %	58.93	6.34	24.90	8.52	1.19	0.03	0.04
$\Sigma РЗЭ^{****}$, г/т	184	238	96	63	35	—	—
ЛРЗЭ/ТРЗЭ****	1.20	1.26	1.35	1.35	1.30	—	—
$Ce_{ан}^{****}$	1.07	1.04	1.06	1.16	0.95	—	—
Количество находок минералов РЗЭ на 1 см ² поверхности пробы (частота встречаемости)	50	24	3	4	—	—	—

Примечание. Масса пробы для гранулометрического анализа — 98.03 г. Прочерк — содержание РЗЭ не проанализировано, минералы РЗЭ не обнаружены.

*Присутствует растительный детрит.

**Много растительного детрита, ракуша.

***Фракция состоит из мелкой ракуши.

****Данные взяты из работы [Sattarova et al., 2023], значения ЛРЗЭ/ТРЗЭ и $Ce_{ан}$ пересчитаны на PAAS.

Таблица 6. Коэффициенты концентрации химических элементов в железистых образованиях юго-восточной части моря Лаптевых относительно вмещающих осадков

Элемент	LV83-29, $n = 5$			LV83-31, $n = 5$			LV83-33, $n = 5$		
	x_{cp}	x_{min}	x_{max}	x_{cp}	x_{min}	x_{max}	x_{cp}	x_{min}	x_{max}
Fe	4.18	4.16	4.20	2.50	2.49	2.52	2.33	2.31	2.34
Mn	0.86	0.79	0.94	0.60	0.42	0.72	1.14	0.86	1.43
P	7.88	7.41	8.25	4.67	4.49	4.98	5.37	5.05	5.60
Si	0.68	0.67	0.70	0.88	0.86	0.90	0.91	0.89	0.93
Al	0.71	0.69	0.74	0.82	0.82	0.83	0.91	0.90	0.91
K	0.69	0.68	0.70	0.79	0.78	0.80	0.85	0.84	0.87
Na	0.73	0.72	0.75	0.83	0.82	0.84	0.74	0.72	0.77
Ca	1.17	1.09	1.28	1.12	1.06	1.21	1.26	1.23	1.31
Mg	0.87	0.84	0.90	0.91	0.87	0.93	1.06	1.03	1.10
Ti	0.40	0.30	0.47	0.44	0.39	0.53	0.44	0.36	0.53
Li	0.60	0.58	0.61	0.63	0.61	0.65	0.39	0.39	0.40
Be	0.60	0.55	0.63	0.84	0.73	0.98	0.80	0.77	0.84
V	0.78	0.75	0.80	0.73	0.73	0.74	0.78	0.78	0.79
Cr	0.72	0.69	0.76	0.68	0.65	0.72	0.79	0.76	0.81
Co	1.26	1.20	1.35	1.25	1.18	1.34	0.96	0.91	1.01
Ni	0.99	0.94	1.02	0.93	0.91	0.96	0.66	0.65	0.68
Cu	0.96	0.92	1.04	1.27	1.24	1.30	1.02	1.02	1.03
Zn	1.04	1.02	1.05	0.99	0.98	1.02	0.84	0.83	0.85
Ga	0.71	0.66	0.77	0.68	0.64	0.73	0.85	0.83	0.87
As	17.88	17.26	18.60	6.12	6.08	6.18	6.24	6.21	6.27
Rb	0.69	0.67	0.70	0.75	0.74	0.76	0.77	0.76	0.78
Sr	1.54	1.52	1.55	1.34	1.32	1.36	1.37	1.37	1.38
Zr	0.38	0.37	0.39	0.43	0.42	0.43	0.41	0.41	0.42
Nb	0.35	0.28	0.42	0.37	0.32	0.43	0.36	0.32	0.43
Mo	6.26	6.11	6.34	3.61	3.26	3.95	2.15	2.07	2.21
Sn	0.56	0.49	0.60	1.20	1.12	1.29	0.66	0.61	0.73
Sb	2.01	1.81	2.24	1.04	0.84	1.19	1.49	1.44	1.55
Cs	0.84	0.73	0.99	0.85	0.84	0.86	0.98	0.95	1.01
Ba	0.79	0.78	0.80	0.88	0.33	1.44	0.92	0.92	0.92
Hf	0.49	0.44	0.53	0.51	0.46	0.57	0.56	0.56	0.58
Ta	0.40	0.18	0.55	0.36	0.27	0.44	0.33	0.27	0.38
W	1.30	1.23	1.40	1.16	1.10	1.23	0.81	0.79	0.84
Tl	1.33	1.18	1.57	1.68	1.50	1.94	1.33	1.25	1.43
Pb	1.06	1.03	1.10	1.01	0.99	1.02	0.94	0.94	0.95
Th	0.61	0.59	0.63	0.68	0.65	0.72	0.65	0.58	0.72
U	2.18	2.02	2.35	1.57	1.15	1.90	0.90	0.86	0.92
Sc	0.72	0.69	0.77	0.65	0.53	0.75	0.88	0.87	0.89
Y	1.04	0.99	1.11	0.70	0.68	0.73	0.76	0.75	0.77
La	0.99	0.93	1.06	0.88	0.86	0.90	0.83	0.82	0.84
Ce	0.83	0.81	0.85	0.79	0.78	0.80	0.70	0.69	0.71
Pr	0.92	0.85	0.99	0.87	0.77	1.04	0.79	0.78	0.80
Nd	1.02	0.97	1.07	0.95	0.92	0.99	0.94	0.90	0.96
Sm	1.03	0.88	1.17	0.99	0.94	1.11	0.85	0.83	0.87
Eu	1.03	0.91	1.26	0.79	0.73	0.86	0.97	0.91	1.05
Gd	1.06	0.99	1.16	0.75	0.74	0.79	0.92	0.90	0.94
Tb	1.15	1.02	1.39	0.88	0.74	1.04	0.86	0.80	0.95
Dy	1.25	1.14	1.38	0.98	0.83	1.16	1.08	1.03	1.15
Ho	1.01	0.76	1.38	0.94	0.88	1.02	0.85	0.79	0.90
Er	1.05	0.77	1.35	0.87	0.75	1.05	0.98	0.96	0.99
Tm	1.02	0.71	1.36	0.70	0.57	0.88	0.75	0.67	0.81
Yb	1.01	0.95	1.10	0.79	0.58	0.97	0.88	0.87	0.90
Lu	0.89	0.83	0.99	0.78	0.64	0.91	0.79	0.71	0.90

показателю $OB_{тер}$ терригенным является 82—85 % органического вещества (см. табл. 2). Полученные нами значения C/N укладываются в интервал 9—12, при этом терригенные осадки арктического бассейна характеризуются, как правило, значениями 10—20 [The Organic Carbon..., 2004]. Вообще, море Лаптевых, как и все арктические моря, отличается от морей других климатических зон значительным поуплением на дно терригенного органического вещества, снесенного с суши, сильно преобразованного как в условиях древнего диагенеза и литогенеза, так и в процессе транспортировки и потому с трудом усваиваемого микроорганизмами, что, в свою очередь, существенно замедляет скорость протекающих в современных осадках биогеохимических реакций [Романкевич, Ветров, 2001; The Organic Carbon..., 2004; Леин, 2013]. Значения всех рассмотренных показателей состава и генезиса органического вещества (см. табл. 2) демонстрируют зависимость от близости/удаленности станций пробоотбора от суши, а именно от устьев рек Лены и Яны (см. рис. 1). Тем самым подтверждается сильное влияние на процесс седиментации и диагенеза сноса с суши терригенного материала, особенно с речным стоком. Влияние можно проследить, в частности, по таким показателям, как соленость и направление в море потоков опресненных вод (см. рис. 1).

Юго-восточная часть моря Лаптевых (район исследования) — район неглубоких малоподвижных сильноопресненных вод с высокими скоростями седиментации, определяемыми поставкой с прилегающей суши большого количества терригенного осадочного материала и органического вещества [Романкевич, Ветров, 2001; Большианов и др., 2014; Бургутто и др., 2016]. На окисление органического вещества расходуется основная часть кислорода, в итоге в придонных водах формируется дефицит кислорода до 50 % и окисленный слой в осадках представляет собой тонкую поверхностную пленку. Надо полагать, что в изученных осадках имел место субокислительный диагенез (см. рис. 5), а сравнительно благоприятные условия для диагенетического минералообразования сложились в районе ст. LV83-29 — самой удаленной от суши, с достаточно высокими, но не экстремальными (около 30 см/тыс. лет [Vauch et al., 2001]) скоростями осадконакопления, с максимальной среди осадков отработанных станций (в абсолютной оценке — все-таки низкой) долей подвижных форм органического вещества за счет вклада морской составляющей.

Изученные ЖО отличает небольшой дефицит церия, обогащение средними РЗЭ относительно сланца РААС и при этом обеднение марганцем (рис. 4, а; табл. 3, 4) [Колесник и др., 2021]. Важную роль в формировании ЖО сыграла биотурбация. По каналам, создаваемым роющими бентосными организмами, кислород с поверхности дна проникал глубже в осадок [Hölemann et al., 1999; Kristensen, 2000]. У стенок каналов шло окисление восстановленных форм железа с образованием гидроксидов. На гидроксидах железа сорбировались фосфор, мышьяк, молибден. Этими элементами ЖО существенно обогащены относительно вмещающих осадков (см. табл. 6). И в ЖО, и в осадках между железом, фосфором, мышьяком и молибденом отмечается сильная положительная корреляционная связь [Колесник и др., 2021]. В осадке найдена минеральная фаза железа с фосфором и кальцием (см. рис. 3, б; табл. 1, ан. 4), состав которой похож на состав железокальциевых гидроксофосфатов, встречаемых в речной взвеси, осадках и ЖМО шельфа и глубоководных районов океана [Дубинин, 2006; Колесник, Колесник, 2015]. Что касается РЗЭ, то они также сорбировались на гидроксидах железа, хотя значительно менее активно, чем фосфор, мышьяк и молибден.

Средний состав РЗЭ изученных нами ЖО в нормализованном виде в целом подобен составу РЗЭ ЖМО моря Лаптевых, изученных ранее Г.Н. Батуриным (см. рис. 1, 4, а). Вместе с тем между нашими и ранее изученными образцами отмечается сильное различие в содержании марганца, кремния и скандия и менее существенное — в суммарном содержании РЗЭ (в среднем 0.18 и 13.48 % Mn, 22.1 и 11.49 % Si, 10.2 и 5.4 г/т Sc, 173 и 136 г/т ΣРЗЭ соответственно). Данное различие связано со спецификой условий железомарганцевого минералообразования. В нашей работе изучались главным образом ожелезненные трубки полихет, которые образовались в условиях субокислительного диагенеза. В работе Г.Н. Батурина это округлые железомарганцевые конкреции и ожелезненные трубки полихет, которые, судя по всему, являются продуктом окислительного и субокислительного диагенеза. ЖМО моря Лаптевых являются диагенетическими, но по своему обеднению основными и малыми рудными элементами, включая РЗЭ, и наличию отрицательной цериевой аномалии схожи с гидротермальными ЖМО океана. Именно это отражают генетические диаграммы (см. рис. 5). Суммарное содержание РЗЭ в ЖМО моря Лаптевых ниже, чем во вмещающих осадках, соизмеримо или несколько уступает значениям, которые обнаруживаются в ЖМО других арктических морей (первые сотни г/т), и на порядок ниже значений, типичных для ЖМО глубоководных районов океана [Ingri, Pontér, 1987; Стрекопытов, Дубинин, 2001; Дубинин, 2006; Hein et al., 2013; Vau et al., 2014; Колесник, Колесник, 2015; Vereshchagin et al., 2019]. Низкое содержание рудных элементов в изученных нами ЖО отражает высокую скорость их формирования, которая должна опережать скорость седиментации. Естественно, что отложение новых порций осадка приводит к захоронению ЖО и попаданию их в зону восстановления железа [Калиненко, 1984]. В итоге ЖО не сохраняются, растворяются. Железо с сопутствующими элементами мигрирует к грани-

це окисления, образуя новые стяжения; некоторая часть железа фиксируется в виде сульфидов в осадках анаэробной зоны. Еще одним следствием формирования ЖО в условиях приконтинентального литогенеза является скромный вклад в суммарное содержание РЗЭ реакционноспособных форм, мобилизованных в ходе диагенетических реакций (максимум реакционноспособных форм приходится на средние РЗЭ) [Стрекопытов, Дубинин, 2001; Дубинин, 2006].

Полученное нами и другими исследователями [Hölemann et al., 1999; Астахов и др., 2018] содержание лантаноидов в осадках юго-восточной части моря Лаптевых, в том числе во вмещающих ЖО, обычно превышает 200 г/т. Это соизмеримо с содержанием РЗЭ в сланцах: постархейском австралийском PAAS (185 г/т) и североамериканском NASC (173 г/т) [Gromet et al., 1984; McLennan, 1989], но ощутимо выше содержания в современных осадках приконтинентального типа литогенеза, включая арктические области (в основном до 110—120 г/т) [Chen et al., 2003; Дубинин, 2006; Астахов и др., 2018]. Состав РЗЭ в изученных образцах (см. рис. 4, б; табл. 4) подобен тому, который обычно наблюдается в терригенных осадках морей (обогащение легкими РЗЭ относительно тяжелых РЗЭ при величине цериевой аномалии почти равной единице) [Дубинин, 2006]. Рассмотрение особенностей пофракционного распределения РЗЭ в осадках юго-восточной части моря Лаптевых с привлечением опубликованных данных [Sattarova et al., 2023] показало, что наиболее обогащенными являются фракции < 32 мкм (максимум находок минералов РЗЭ и высокое содержание РЗЭ) и 32—63 мкм (максимальное содержание РЗЭ и множество находок минералов РЗЭ) (см. табл. 5).

При сопоставлении содержания и нормализованного распределения лантаноидов в изученных осадках и во взвеси, отобранной в р. Лена в июле 1994 г. и в июле—начале августа 1995 г., отмечается практически полное соответствие: содержание немногим более 200 г/т и незначительное обогащение легкими и средними РЗЭ (см. рис. 4, б). Во взвеси, отобранной в р. Яна в августе 1995 г., содержание тоже достаточно высокое, но ниже, чем в Лене (161 г/т); в нормализованном составе имеет место ряд особенностей: обеднение легкими РЗЭ и отчетливая положительная аномалия европия. Высокое содержание РЗЭ во взвеси рек Лена и Яна объясняется наследованием состава пород суши. В областях, питающих юго-восточную часть моря Лаптевых осадочным материалом, преобладают терригенные отложения Сибирской платформы с расположенными в пределах платформы Анабарским и Алданским щитами [Rachold, 1999, рис. 1]. Специфика в содержании и распределении лантаноидов во взвеси Яны обусловлена, вероятно, присутствием на водосборной площади относительно большого количества гранитно-метаморфических пород и относительно грубым составом взвеси [Rachold, 1999].

В отличие от ЖО, в рудном веществе которых РЗЭ находятся главным образом в сорбированной форме (поглощение гидроксидами железа), в осадках присутствуют также собственные минералы РЗЭ, среди которых доминирует монацит-(Ce) пелитоалевритовой размерности (см. рис. 3; табл. 1, 5). Не вызывает сомнений, что минералы РЗЭ поступили в осадки с суши в составе терригенного материала, в ЖО — при цементации частиц осадка гидроксидами железа. Минералы РЗЭ, как известно, обладают относительно небольшим удельным весом (ниже 7), повышенной твердостью и устойчивостью, обычно не имеют тесной связи с коренным источником и формируют площадные или региональные россыпи. В пределах района исследования отмечены участки с содержанием ортита и монацита в осадках 2—3 % [Большаянов и др., 2014; Бургуто и др., 2016]. Участок на продолжении м. Буор-Хая (см. рис. 1) оценен как перспективный для поиска россыпей минералов РЗЭ [Пуминов, Волк, 1971]. В отличие от иттрия и лантаноидов, скандий, судя по всему, присутствует в осадках и в ЖО только в качестве очень небольшой изоморфной примеси в обломочных минералах. На это указывает отсутствие находок собственных минералов и даже примеси в других минералах при среднем содержании в ЖО — 10.2 г/т, в осадках — 14.2 г/т (см. табл. 4). Скандий относится к группе рассеянных литофильных элементов. Соответственно, главная его масса рассредоточена в минералах, содержащих эти элементы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексное минералого-геохимическое исследование ЖО юго-восточной части моря Лаптевых, представленных большей частью биоморфозами по трубкам полихет в поверхностном (подповерхностном) слое терригенных осадков, показало, что общее распределение РЗЭ — результат соотношения рудного и нерудного вещества.

Рудное вещество ЖО — продукт субокислительного диагенеза, усиленного процессами биотурбации. Рудное вещество сложено преимущественно гидроксидами железа — лимонитом. Гидроксиды железа сорбировали лантаноиды, иттрий и другие микроэлементы. Таким образом, с рудным веществом ЖО связаны слабовыраженный дефицит церия ($Se_{ан}$ в среднем 0.94) и до некоторой степени повышенное относительно сланца PAAS содержание средних РЗЭ, а также довольно существенное накопление мышьяка, фосфора, молибдена (среднее значение КК — 10.08, 5.97 и 4.01 соответственно).

Нерудное вещество поступает в ЖО из терригенных осадков. Оно имеет (алюмо)силикатный состав и, судя по всему, определяет в ЖО содержание скандия и других литофильных элементов. При

нормализации на состав сланца PAAS в осадках заметно некоторое обогащение легкими и средними РЗЭ при отсутствии аномального поведения церия (среднее значение $C_{e_{ан}}$ — 1.06). Составы РЗЭ осадков сходны с составом взвеси р. Лена. С осадком в ЖО поступают минералы РЗЭ, почти 80 % которых представлено монацитом-(Ce). Основное количество находок минералов РЗЭ в осадке связано с фракциями мельче 63 мкм.

Суммарное содержание РЗЭ в ЖО ниже, чем в осадках (в среднем 173 и 206 г/т соответственно), что объясняется довольно высокой скоростью роста ЖО, которая должна опережать скорость седиментации, и указывает на небольшое количество подвижных форм РЗЭ, участвовавших в постседиментационных процессах.

Органическое вещество содержится в ЖО в достаточно большом количестве ($C_{орг}$: 1.46—2.63 %). Примерно такое же содержание характерно для осадков ($C_{орг}$: 1.31—2.15 %), при этом органическое вещество в осадках имеет преимущественно терригенный генезис ($OB_{тер}$ — до 85 %). Высокое содержание $C_{орг}$ в осадках ведет к общему вялому протеканию процессов диагенетического минералообразования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 121021700342-9).

ЛИТЕРАТУРА

Астахов А.С., Семилетов И.П., Саттарова В.В., Ши С., Ху Л., Аксентов К.И., Василенко Ю.П., Иванов М.В. Редкоземельные элементы донных осадков восточно-арктических морей России как индикаторы терригенного сноса // ДАН, 2018, т. 482, № 4, с. 451—455, doi: 10.31857/S086956520003043-0.

Батурин Г.Н. Распределение элементов в железомарганцевых конкрециях морей и озер // Литология и полезные ископаемые, 2019, № 5, с. 404—417, doi: 10.31857/S0024-497X20195404-417.

Батурин Г.Н., Дубинчук В.Т. Состав железомарганцевых конкреций моря Лаптевых // Геология морей и океанов: материалы XIX Международной научной конференции (школы) по морской геологии. М., ГЕОС, 2011, т. 2, с. 143—147.

Богданов Ю.А., Горшков А.И., Гурвич Е.Г., Богданова О.Ю., Дубинина Г.И., Иванов Г.В., Исаева А.Б., Муравьев К.Г. Железо-марганцевые конкреции Карского моря // Океанология, 1994, т. 34, № 5, с. 789—800.

Большиков Д.Ю., Васильев Б.С., Виноградова Н.П., Гавриш А.В., Заварзина Г.А., Зинченко А.Г., Зуйкова О.Н., Кямяря В.В., Мохов В.В., Нагайцева Н.Н., Нелюбин В.В., Радченко М.С., Саванин В.В., Проскурнин В.Ф., Рекант П.В., Солонина С.Ф., Шкарубо С.И., Шмяняк А.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Лаптево-Сибироморская. Лист S-51 — Оленекский зал, S-52 — дельта р. Лены. Объяснительная записка. СПб, Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014, 274 с.

Бургуто А.Г., Дорофеев В.К., Рекант П.В., Шкарубо С.И., Авдюничев В.В., Журавлев В.А., Зуйкова О.Н., Иванова А.М., Иванова В.В., Неупокоева А.А., Пашковская Е.А., Радченко М.С. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Лаптево-Сибироморская. Лист S-53 — о. Столбовой, S-54 — Ляховские острова. Объяснительная записка. СПб, Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016, 300 с.

Ветров А.А., Семилетов И.П., Дударев О.В., Пересыпкин В.И., Чаркин А.Н. Исследование состава и генезиса органического веществ донных осадков Восточно-Сибирского моря // Геохимия, 2008, № 2, с. 183—195.

Геологический словарь / Ред. К.Н. Паффенгольц. М., Недра, 1973, 487 с.

Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М., Наука, 2006, 360 с.

Зарубина Н.В., Блохин М.Г., Михайлик П.Е., Сегренев А.С. Определение элементного состава стандартных образцов железомарганцевых образований методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Стандартные образцы, 2014, № 3, с. 33—44.

Калиненко В.В. Погребенные конкреции в отложениях арктических морей // Геология океанов и морей: тезисы докладов 6-й Всесоюзной школы по морской геологии. М., ИО АН СССР, 1984, т. 3, с. 63—64.

Каминский В.Д., Супруненко О.И., Смирнов А.Н. Минерально-сырьевые ресурсы арктической континентальной окраины России и перспективы их освоения // Арктика: экология и экономика, 2014, № 3 (15), с. 52—61.

Колесник А.Н., Колесник О.Н., Карабцов А.А., Бондарчук Н.В. Минеральные зерна цветных и благородных металлов в поверхностном слое донных осадков Чукотского моря // ДАН, 2018, т. 481, № 1, с. 76—80, doi: 10.31857/S086956520000055-3.

Колесник О.Н., Колесник А.Н. Редкие земли и иттрий в железомарганцевых конкрециях Чукотского моря // Литология и полезные ископаемые, 2015, № 3, с. 203—214, doi: 10.7868/S0024497X15030064.

Колесник О.Н., Колесник А.Н., Жэнь С., Карабцов А.А., Астахов А.С., Ши С. Первые данные о распределении редкоземельных элементов в железомарганцевых образованиях моря Лаптевых // ДАН, 2021, т. 497, № 1, с. 37—43, doi: 10.31857/S2686739721030063.

Кошелева В.А., Яшин Д.В. Донные осадки арктических морей России. СПб, ВНИИОкеангеология, 1999, 286 с.

Лейн А.Ю. Биогеохимические процессы раннего диагенеза в современных отложениях морей российской Арктики // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: материалы VII Всероссийского литологического совещания. Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2013, т. 2, с. 163—165.

Пуминов А.П., Волк В.Е. К проблеме прогнозирования россыпей на арктическом побережье и шельфе СССР // Геология моря, вып. 1 / Ред. Н.Н. Лапина. Л., Изд-во НИИГА, 1971, с. 22—34.

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

Сочеванова М.М. Ускоренный анализ осадочных горных пород с применением комплексонометрии. М., Наука, 1969, 230 с.

Стрекопытов С.В., Дубинин А.В. К геохимии железистых стяжений Баренцева моря // Океанология, 2001, т. 41, № 3, с. 386—393.

Химический анализ горных пород и минералов. М., Недра, 1974, 248 с.

Ходоренко Н.Д., Волкова Т.И., Звалинский И.И., Тищенко П.Я. Кинетика извлечения и количественное определение гуминовых веществ в донных отложениях // Геохимия, 2012, № 4, с. 423—430.

Abramova E., Tuschling K. A 12-year study of the seasonal and interannual dynamics of mesozooplankton in the Laptev Sea: Significance of salinity regime and life cycle patterns // Global Planet. Change, 2005, v. 48, p. 141—164, doi: 10.1016/j.gloplacha.2004.12.010.

Astakhov A.S., Sattarova V.V., Shi X., Hu L., Aksentov K.I., Alatortsev A.V., Kolesnik O.N., Marish A.A. Distribution and sources of rare earth elements in sediments of the Chukchi and East Siberian Seas // Polar Sci., 2019, v. 20, p. 148—159, doi: 10.1016/j.polar.2019.05.005.

Bau M., Schmidt K., Koschinsky A., Hein J., Kuhn T., Usui A. Discriminating between different genetic types of marine ferro-manganese crusts and nodules based on rare earth elements and yttrium // Chem. Geol., 2014, v. 381, p. 1—9, doi: 10.1016/j.chemgeo.2014.05.004.

Bauch H.A., Mueller-Lupp T., Taldenkova E., Spielhagen R.F., Kassens H., Grootes P.M., Thiede J., Heinemeier J., Petryashov V.V. Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin // Global Planet. Change, 2001, v. 31 (1—4), p. 125—139, doi: 10.1016/S0921-8181(01)00116-3.

Chen Z., Gao A., Liu Y., Sun H., Shi X., Yang Z. REE geochemistry of surface sediments in the Chukchi Sea // Sci. China (Ser. D), 2003, v. 46 (6), p. 603—611, doi: 10.1007/BF02984538.

Frank M., O’Nions R.K., Hein J.R., Banakar V.K. 60 Myr records of major elements and Pb-Nd isotopes from hydrogenous ferromanganese crusts: Reconstruction of seawater paleochemistry // Geochim. Cosmochim. Acta, 1999, v. 63 (11—12), p. 1689—1708, doi: 10.1016/S0016-7037(99)00079-4.

Gromet L.P., Haskin L.A., Korotev R.L., Dymek R.F. The “North American shale composite:” Its compilation, major and trace element characteristics // Geochim. Cosmochim. Acta, 1984, v. 48 (12), p. 2469—2482, doi: 10.1016/0016-7037(84)90298-9.

Hein J.R., Mizell K., Koschinsky A., Conrad T.A. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources // Ore Geol. Rev., 2013, v. 51, p. 1—14, doi: 10.1016/j.oregeorev.2012.12.001.

Hölemann J.A., Schirmacher M., Kassens H., Prange A. Geochemistry of surficial and ice-rafted sediments from the Laptev Sea (Siberia) // Estuarine Coastal Shelf Sci., 1999, v. 49 (1), p. 45—59, doi: 10.1006/ecss.1999.0485.

Ingri J., Pontér C. Rare earth abundance patterns in ferromanganese concretions from the Gulf of Bothnia and the Barents Sea // Geochim. Cosmochim. Acta, 1987, v. 51 (1), p. 155—161.

Kristensen E. Organic matter diagenesis at the oxic/anoxic interface in coastal marine sediments, with emphasis on the role of burrowing animals // Hydrobiologia, 2000, v. 426, p. 1—24, doi: 10.1023/A:1003980226194.

Kuzyk Z.Z., Gobeil C., Goñi M., Macdonald R.W. Early diagenesis and trace element accumulation in North American Arctic margin sediments // Geochim. Cosmochim. Acta, 2017, v. 203, p. 175—200, doi: 10.1016/j.gca.2016.12.015.

McLennan S.M. Rare earth elements in sedimentary rocks; influence of provenance and sedimentary processes // Rev. Mineral. Geochem., 1989, v. 21, p. 169—200.

Nielsen S.G., Mar-Gerrison S., Gannoun A., LaRowe D., Klemm V., Halliday A.N., Burton K.W., Hein J.R. Thallium isotope evidence for a permanent increase in marine organic carbon export in the early Eocene // Earth Planet. Sci. Lett., 2009, v. 278 (3—4), p. 297—307, doi: 10.1016/j.epsl.2008.12.010.

Rachold V. Major, trace and rare earth element geochemistry of suspended particulate material of East Siberian rivers draining to the Arctic Ocean // *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History* / Eds. H. Kassens, H.A. Bauch, I. Dmitrenko, H. Eicken, H.-W. Hubberten, M. Melles, J. Thiede, L. Timokhov. Berlin, Springer, 1999, p. 199—222.

Sattarova V., Astakhov A., Aksentov K., Shi X., Hu L., Liu Y., Polyakov D., Alatortsev A., Kolechnik O. Geochemistry of the Laptev and East Siberian seas sediments with emphasis on rare-earth elements: Application for sediment sources and paleoceanography // *Cont. Shelf Res.*, 2023, v. 254, 104907, doi: 10.1016/j.csr.2022.104907.

The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean / Eds. R. Stein, R.W. Macdonald. Berlin, Springer, 2004, 363 p.

Vereshchagin O.S., Perova E.N., Brusnitsyn A.I., Ershova V.B., Khudoley A.K., Shilovskikh V.V., Molchanova E.V. Ferro-manganese nodules from the Kara Sea: Mineralogy, geochemistry and genesis // *Ore Geol. Rev.*, 2019, v. 106, p. 192—204, doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.01.023.

Walsh J.J., McRoy C.P., Coachman L.K., Goering J.J., Nihoul J.J., Whitedge T.E., Blackburn T.H., Parker P.L., Wirick C.D., Shuert P.G., Grebmeier J.M., Springer A.M., Tripp R.D., Hansell D.A., Djenidi S., Deleersnijder E., Henriksen K., Lund B.A., Andersen P., Müller-Karger F.E., Dean K. Carbon and nitrogen cycling within the Bering/Chukchi Seas: Source regions for organic matter effecting AOU demands of the Arctic Ocean // *Prog. Oceanogr.*, 1989, v. 22 (4), p. 277—359, doi: 10.1016/0079-6611(89)90006-2.