

УДК 551.465

СИСТЕМАТИКА Cr, Co И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОСАДОЧНОМ МАТЕРИАЛЕ ДРЕЙФУЮЩИХ ЛЬДОВ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КРУГОВОРОТА БОФОРТА

© 2017 г. В. П. Шевченко¹, А. В. Маслов², А. П. Лисицын¹, А. Н. Новигатский¹, Р. Штайн³¹Институт океанологии РАН, 117997, г. Москва, Нахимовский просп., 36, e-mail: vshevch@ocean.ru²Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15, e-mail: amas2004@mail.ru³Институт полярных и морских исследований им. А. Вегенера, 27515, Bremerhaven, Postfach 12 01 61, Germany, e-mail: ruediger.stein@awi.de

Поступила в редакцию 15.06.2016 г.; принята к печати 12.10.2016 г.

В статье рассмотрены результаты анализа систематики Cr, Co и редкоземельных элементов (РЗЭ) в транспортируемом льдами осадочном материале (IRS – ice-rafted sediments) северной части круговорота Бофорта (Северный Ледовитый океан). IRS собран в рейсе ARK-XIV-1/a НИС “Поларштерн” в 1998 г. Точное положение источников присутствующего во льдах IRS до настоящего времени не установлено. Это обусловлено, с одной стороны, сложным круговоротом льдов в Арктическом бассейне, с другой – относительно небольшим количеством данных собственно о составе IRS. По представлениям большинства исследователей, основным поставщиком IRS является широкий и мелководный сибирский арктический шельф. В море Бофорта, отличительные особенности которого – существенно более узкий шельф и почти постоянное присутствие льда в летний период, условия для формирования IRS не столь благоприятны. Содержания редких и рассеянных элементов в пробах IRS определены с помощью ИНАА в ГЕОХИ РАН. В результате исследований установлено, что вариации $(La/Yb)_N$ в IRS из северной части круговорота Бофорта характеризуются значениями 8.5–15.5. Они в полной мере соответствуют как средней величине данного параметра во взвеси рр. Маккензи и Арктик-Ред-Ривер (8.6 и 8.5), так и среднему значению $(La/Yb)_N$ для кристаллических образований Канадского щита (14.4). В этот же диапазон укладываются величины $(La/Yb)_N$ для взвеси рр. Яны и Лены (8.7 и 12.4), что может указывать на возможность присутствия в IRS материала, заимствованного на шельфе восточной части моря Лаптевых. На диаграмме Co–Cr не наблюдается перекрытия полей составов современных донных осадков эстуария р. Енисей, с одной стороны, и восточной части Восточно-Сибирского и Чукотского морей, с другой, а осадки дельты р. Маккензи, хотя и сопоставимы с осадками эстуария р. Енисей по содержанию Cr, отличаются от них заметно более низким содержанием Co. На диаграмме Cr–La поле IRS занимает в существенной степени обособленное положение, обладая, все же определенным перекрытием с полями осадков Чукотского моря и дельты р. Маккензи. На диаграмме $(La/Yb)_N$ –La/Co поле состава IRS имеет ~50-процентное перекрытие с полем состава современных донных осадков Чукотского моря. К нему тяготеет и средняя точка взвеси р. Лены, а точка Канадского щита расположена относительно недалеко, также как и точки взвеси рр. Маккензи и Арктик-Ред-Ривер и PAAS. Перекрытия полей IRS и современных донных осадков эстуариев Оби и Енисея, а также востока Восточно-Сибирского моря, напротив, не наблюдается. Приведенные в статье данные позволяют сделать вывод о присутствии в составе IRS из района Северного полюса осадочного материала, заимствованного как на шельфе моря Бофорт, так и на шельфах восточной части моря Лаптевых и Чукотского моря.

Ключевые слова: Арктика, осадочный материал, дрейфующие льды, хром, кобальт, редкоземельные элементы, круговорот Бофорта, Трансполярный дрейф

Cr, Co AND RARE EARTH ELEMENTS SYSTEMATICS IN ICE-RAFTED SEDIMENTS OF NORTHERN PART OF THE BEAUFORT GYRE

Vladimir P. Shevchenko¹, Andrey V. Maslov², Alexandr P. Lisitzin¹, Alexandr N. Novigatsky¹, Rüdiger Stein³¹P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, 117997, Nakhimovsky av., 36, Moscow, Russia, e-mail: vshevch@ocean.ru²A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, 620016, Akad. Vonsovsky st., 15, Ekaterinburg, Russia, e-mail: amas2004@mail.ru³Alfred Wegener Institute of Polar and Marine Research, 27515, Bremerhaven, Postfach 12 01 61, Germany, e-mail: ruediger.stein@awi.de

Received 15.06.2016; accepted 12.10.2016

The results of analysis of the systematics of Cr, Co and rare earth elements (REE) in ice-rafted sediments (IRS) of the northern part of the Beaufort Cycle (Arctic Ocean) are considered in the article. The IRS was assembled on the ARK-XIV-1/a cruise of the NIS Polarstern in 1998. The exact position of the sources of the IRS present in the ice has not been established to date. This is due, on the one hand, to the complex ice cycle in the Arctic Basin, on the other – a relatively small amount of data on the actual composition of the IRS. According to the views of most researchers, the main IRS supplier is the wide and shallow Siberian Arctic shelf. In the Beaufort Sea, the distinctive features of which are a much narrower shelf and almost constant presence of ice in the summer period, the conditions for the formation

of the IRS are not so favorable. The contents of rare and scattered elements in the IRS samples were determined with the help of INAA at GEOKHI RAS. As a result of the research it was established that variations $(La/Yb)_N$ in the IRS from the northern part of the Beaufort cycle are characterized by the values 8.5–15.5. They fully correspond to the average value of this parameter in the suspension of pp. Mackenzie and the Arctic-Red River (8.6 and 8.5) and the mean $(La/Yb)_N$ for the crystalline formations of the Canadian Shield (14.4). In the same range are included, the values of $(La/Yb)_N$ for the suspension of Yana and Lena rivers (8.7 and 12.4), which may indicate the possibility of the presence in the IRS of material borrowed on the shelf of the eastern Laptev Sea. In the Co–Cr diagram, there is no overlapping of the fields of the compositions of the present bottom sediments of the estuary of Yenisei River, on the one hand, and the eastern part of the East Siberian and Chukchi seas, on the other. Although the sediments of the delta of the Mackenzie River, comparable to the precipitation of the estuary of the Yenisei River, by the content of Cr and differ from them by a noticeably lower content of Co. In the Cr–La diagram, the IRS field occupies an essentially isolated position, yet still has a certain overlap with the precipitation fields of the Chukchi Sea and the delta of Mackenzie River. In the diagram $(La/Yb)_N$ –La/Co, the field of IRS composition has a $\approx 50\%$ overlap with the field of the present bottom sediments composition of the Chukchi Sea. The middle point of the suspension also gravitates towards Lena River, and the point of the Canadian Shield is relatively close, as well as the points of suspension of Mackenzie and Arctic-Red rivers and PAAS. Overlapping of the IRS fields and modern bottom sediments of the Ob and Yenisei estuaries, as well as the east of the East Siberian Sea, on the contrary, is not observed. The data given in the article allow us to conclude that the IRS in the area of the North Pole contains sedimentary material, borrowed both on the shelf of the Beaufort Sea and on the shelves of the eastern part of the Laptev Sea and the Chukchi Sea.

Keywords: Arctic, sedimentary material, drifting ice, chrome, cobalt, rare earth elements, the Beaufort cycle, Transpolar drift

Acknowledgements

The authors are grateful to the crew of the NIS “Polarstern“, A.A. Golikov, S.S. Drachev, V.T. Sokolov, E.E. Musatov, J. Hefter, C. Müller, K. Polozek, C. Rödle, R. Usbeck, M.-K. Yoon for help in sampling, D.Yu. Sapozhnikov for the neutron activation analysis, N.S. Glushkova for the drawings to the article.

Research was carried out in the framework of the state assignment for IO RAS (theme No. 0149-2016-0001) and with the financial support of the project of UB RAS № 15-15-5-4.

Для цитирования: Шевченко В.П., Маслов А.В., Лисицын А.П., Новигатский А.Н., Штайн Р. (2017) Систематика Cr, Co и редкоземельных элементов в осадочном материале дрейфующих льдов северной части круговорота Бофорта. *Литосфера*, 17(3), 59-70. DOI: 10.24930/1681-9004-2017-3-059-070

For citation: Shevchenko V.P., Maslov A.V., Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Stein R. (2017) Cr, Co and rare earth elements systematics in ice-rafted sedimentary matter of northern part of the Beaufort Gyre. *Litosfera*, 17(3), 59-70. DOI: 10.24930/1681-9004-2017-3-059-070

ВВЕДЕНИЕ

Исследование особенностей распределения осадочного материала в Арктике, где транспортировка его дрейфующими льдами происходит под влиянием круговорота Бофорта (Амеразийский бассейн) и Трансполярного дрейфа (Евразийский бассейн), дает возможность лучше понять процессы современной седиментации (Лисицын, 1978, 1994, 2010; Шевченко и др., 2002; Левитан и др., 2007, 2012; Dethleff, Kuhlmann, 2010; Lisitzin, 2002; Lisitzin, Shevchenko, 2016; Meese et al., 1997; Nürnberg et al., 1994; Stein, 2008; и др.).

Трансполярный дрейф – главная траектория ледовых потоков – проходит от Чукотского и Восточно-Сибирского морей на востоке до пролива Фрама на западе. Движение льда у Аляски и в Чукотском море происходит примерно параллельно побережью, а в море Лаптевых – от побережья. По этой причине море Лаптевых и часть Восточно-Сибирского моря являются наиболее важными “фабриками льда” в Арктике и, соответственно, одними из основных источников транспортируемого льдами осадочного материала (IRS – Ice Rafted Sediments) (Лисицын, 2010; Lisitzin, Shevchenko, 2016). Различия в минералогии

донных осадков арктических морей, обусловленные различным составом слагающих те или иные регионы Евразии и Северной Америки комплексов пород, отражаются и в их геохимических характеристиках (Viscosi-Shirley, 2001; Viscosi-Shirley et al., 2003; Шевченко и др., 2015, 2017). В последние годы эта информация используется как ключ к реконструкции положения источников IRS в дрейфующих льдах Арктики. Задачей наших исследований являлся анализ систематики редкоземельных элементов (РЗЭ), а также Cr и Co¹ в IRS северной части круговорота Бофорта (рис. 1) и реконструкция на этой основе возможных его источников.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассеянный в дрейфующих льдах центральной части Арктики осадочный материал собран в рейсе ARK-XIV-1/а НИС “Поларштерн” в 1998 г. (ARCTIC’98). Отбор проб производился с поверхно-

¹ Выбор указанных элементов обусловлен тем обстоятельством, что в литературе имеются данные по их содержанию в современных донных осадках большинства морей Российской Арктики и моря Бофорта.

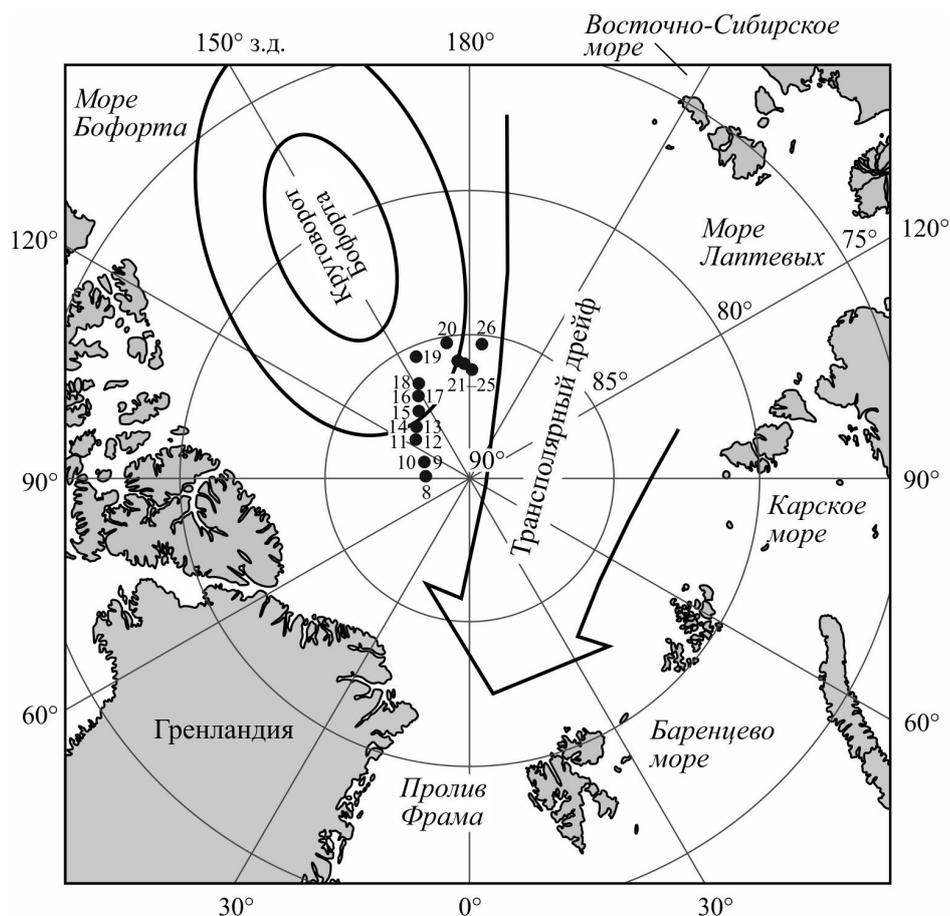


Рис. 1. Положение исследованных проб IRS.

Fig. 1. Location of the investigated IRS samples.

сти дрейфующих льдов ножом из нержавеющей стали и пластиковым совком в пластиковые банки. На борту НИС “Поларштерн” обогащенный осадочным материалом лед расплавлялся при +4°C и после декантации IRS хранился при той же температуре.

Микроскопическая характеристика осадочного материала дана по результатам описания сфер-слайдов, просмотренных под оптическим микроскопом Olympus BX50.

Содержания редких и рассеянных элементов в пробах IRS, отобранных в рейсе ARK-XIV-1/a, определены с помощью инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (аналитик – Д.Ю. Сапожников). Методика описана в статье Г.М. Колесова (1994).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассеянный в дрейфующих льдах центральной части Арктики осадочный материал представлен преимущественно алеврито-пелитовой фракцией. Количество пелитовой фракции варьирует

от 30 до 70%, составляя в среднем 45–50%. Алевритовая фракция имеет преимущественно кварц-полевошпатовый состав с преобладанием полевых шпатов, представлены в ней также эгирин-авгит, гиперстен, геденбергит, мусковит, хлорит, биотит и роговая обманка. Из акцессорных минералов установлены циркон, дистен, непрозрачные минералы. Общее содержание литогенной составляющей в IRS достигает 60–98%. Количество биогенной компоненты в среднем равно 5–10%; представлена она в основном диатомовыми водорослями, присутствуют также скелеты радиолярий и спикулы кремневых губок.

Распределение РЗЭ, Cr и Co в осадочном материале из дрейфующих льдов

Содержание Co в исследованных нами пробах IRS варьирует от 8.7 до 17.5 г/т (табл. 1), при среднем содержании 12.8 ± 2.4 г/т. Среднее содержание Cr составляет ≈ 76 г/т (минимум 60.7, максимум 91 г/т). Средняя величина La/Co равна 3.2 ± 0.5 (минимум 2.4, максимум 4.7). С учетом данных, приве-

Табл. 1. Содержания Cr, Co и РЗЭ в пробах IRS из дрейфующих льдов северной части круговорота Бофорта, г/т**Table 1.** The contents of Cr, Co and REE in the IRS samples from drifting ice in the north part of the Beaufort Gyre, ppm

Компонент	Проба																		
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Co	11.1	8.7	16.0	14.5	14.6	12.6	14.7	12.7	11.4	10.2	14.7	15.1	17.5	10.2	15.6	10.5	10.9	11.8	11.2
Cr	68.7	62.9	86.5	82.9	81.1	69.5	79.7	76.6	89.6	91	74.9	81.9	78.8	60.8	67.2	60.7	71.9	77.3	80.4
La	45.1	41.4	50.1	46.0	46.5	40.1	46.2	43.0	30.2	35.8	40.3	41.5	48.3	33.4	37.9	35.9	32.3	36.6	43.1
Ce	80.0	70.9	89.8	80.9	81.0	70.6	81.0	78.1	54.8	64.7	75.1	78.0	85.1	60.0	69.0	64.7	59.9	65.0	73.0
Pr*	8.0	7.3	8.5	8.0	8.0	7.3	8.1	7.7	5.7	6.9	7.8	7.9	8.1	6.2	7.1	6.7	6.4	6.9	7.3
Nd	28.6	25.0	30.2	29.8	29.8	25.4	30.0	27.3	20.2	24.3	27.8	29.0	29.9	22.5	24.8	23.0	22.8	23.8	25.0
Sm	6.4	5.8	6.8	6.6	6.7	6.0	6.8	6.1	4.7	5.7	6.5	6.7	6.7	5.2	5.8	5.3	5.6	5.5	5.7
Eu	1.4	1.2	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.1	1.2	1.1	1.4	1.4	1.5
Gd*	7.6	6.3	7.4	6.9	7.0	6.7	7.9	7.5	5.3	6.1	7.1	8.0	7.8	6.3	6.7	6.0	6.7	6.5	7.2
Tb	1.1	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	0.8	0.9	1.1	1.2	1.1	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	1.1
Dy*	6.2	5.0	5.9	5.5	5.9	5.4	7.0	6.9	4.3	4.7	6.0	7.0	6.5	5.2	5.5	4.9	5.5	5.5	6.3
Ho*	1.3	1.1	1.2	1.2	1.3	1.2	1.5	1.5	0.9	1.0	1.3	1.5	1.4	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.4
Er*	3.5	2.8	3.3	3.1	3.4	3.1	4.2	4.3	2.3	2.6	3.5	4.2	3.9	3.1	3.1	2.8	3.3	3.2	3.9
Tm*	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	0.4	0.6	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
Yb	2.5	1.8	2.2	2.2	2.4	2.2	3.2	3.4	1.7	1.8	2.7	3.2	2.8	2.3	2.2	1.9	2.5	2.4	3.0

*Данные получены экстраполяцией.

*The data received by extrapolation.

денных в работе (Puy-Alquiza et al., 2014) со ссылками на публикации (Cullers, 2000; Cullers et al., 1988; Cullers, Podkovyrov, 2002; McLennan, 2001; Taylor, McLennan, 1985), это позволяет предполагать, что основными источниками IRS для дрейфующих льдов северной части круговорота Бофорта выступали преимущественно кислые магматические образования и осадочные породы, в составе которых продукты разрушения первых играли существенную роль. Среднее значение параметра La/Cr (0.5 ± 0.1) также существенно отличается от величин данного отношения, свойственных магматическим породам основного состава.

Суммарное содержание РЗЭ в IRS варьирует от 132 до 209 г/т при средней величине 176 ± 22 г/т (для сравнения в PAAS Σ РЗЭ составляет 183 г/т). Среднее значение величины $(La/Yb)_N^2$ для выборки из 19 проб равно 11.6 ± 2.2 (минимум 8.5, максимум 15.5; в PAAS эта величина составляет 9.2). При этом осадочный материал несколько деплетирован тяжелыми лантаноидами ($Gd_N/Yb_{Ncp} = 2.34 \pm 0.29$; в PAAS – 1.36), а величина европиевой аномалии варьирует от 0.5 до 0.8; в среднем австралийском глинистом сланце – 0.66.

Внимательное рассмотрение только параметра $(La/Yb)_N$ позволяет выделить в исследуемой нами совокупности проб IRS из северной части круговорота Бофорта несколько групп. К первой группе ($La_N/Yb_N < 9^3$) принадлежат пробы 15,

19 и 24 (рис. 2). Величина $(Gd/Yb)_N$ в них варьирует от 1.8 до 2.2, а Eu/Eu^* – от 0.51 до 0.70. Вторую группу образуют пробы 14 и 26, в которых величина $(La/Yb)_N$ почти в точности равна ее значению в PAAS (9.7 и 9.8 соответственно), а деплетирование РЗЭ отсутствует (1.98 и 1.97). К третьей группе принадлежат пробы 18, 21 и 25, в которых параметр $(La/Yb)_N$ изменяется от 10.0 до 10.5, наблюдается некоторое обеднение тяжелыми лантаноидами ($2.18 < Gd_N/Yb_N < 2.24$), а величина Eu аномалии изменяется от 0.6 до 0.7. Пробы 20 и 22 обладают значениями $(La/Yb)_N$ 11.5 и 11.7 (эти значения сопоставимы с теми, что характерны для фанерозойских кратонных песчаников (Condie, 1993)). Два других параметра спектров РЗЭ в них сопоставимы с присутствующими пробам из группы 3. Группа 5 объединяет пробы 8, 12, 13 и 16. Для них характерны значения $(La/Yb)_N$ от 12 до 13, при достаточно выраженном деплетировании РЗЭ (2.4–2.6), а значения Eu/Eu^* составляют 0.6–0.7. Группы 6, 7 включают по две пробы (11 и 17, 9 и 10). Значения $(La/Yb)_N$ для первой из них находятся в интервале 13–14, а для второй составляют более 15. Примерно такие же величины указанного параметра спектров РЗЭ присущи архейским гранитоидам (Condie, 1993).

Распределение РЗЭ, Cr и Co во взвеси северных рек и современных донных осадках арктических морей

Обратимся теперь к рассмотрению особенностей распределения Cr и Co, а также параметров спектров РЗЭ во взвеси ряда крупных рек, впадающих в моря Российской Арктики и море Бофорта, а

² Нормировано на хондрит (Taylor, McLennan, 1985).³ Величина $(La/Yb)_N$ в пробах IRS этой группы сопоставима со значениями данного параметра в средних фанерозойских гранитоидах и мезо-кайнозойских граувакках (Condie, 1993).

также их средних значений в современных донных осадках Карского моря, моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей (табл. 2). Приводимые далее данные основаны на материалах работ (Нестерова, 1960; Коновалов и др., 1966; Морозов и др., 1974; Лисицын и др., 1980; Шевченко и др., 1996; Савенко и др., 2004; Савенко, 2006; Асадулин и др., 2013; Астахов и др., 2013; Колесник, 2015; Martin, Meybeck, 1979; Gordeev, Shevchenko, 1995; Rachold et al., 1996; Rachold, 1999; Gaillardet et al., 1999; Chen et al., 2003; Gordeev et al., 2007; Vonk et al., 2015; и др.).

Среднее содержание Cr и Co во взвеси р. Печора, поступающей в основном в восточную часть Баренцева моря, составляет 107 и 33 г/т. Данные о концентрации в ней Yb отсутствуют, что не позволяет рассчитать величину $(La/Yb)_N$.

Для взвеси р. Обь, накапливающейся преимущественно в центральной части Карского моря, средние содержания Cr и Co несколько меньше, чем во взвеси р. Печора (95 и 22 г/т). Значение $(La/Yb)_N$ для нее составляет ≈ 8.1 , деплетирование ТРЗЭ отсутствует, а величина Eu аномалии равна 0.7. Осадки эстуария р. Обь обладают средней величиной $(La/Yb)_N \approx 7.8$. Содержания хрома варьируют в них от 83 до 112 г/т, а кобальта – от 16 до 28 г/т.

Взвесь рек Енисей и Хатанга, поступающая, соответственно, на шельф восточной части Карского моря и западной части моря Лаптевых, обладает сопоставимыми со взвесью р. Печора средними содержаниями Cr и Co (102 и 107 г/т для хрома, и 34 и 33 г/т для кобальта соответственно). В то же время ей свойственны существенно более низкие, чем для взвеси рек Печора и Обь, значения $(La/Yb)_N$ (6.6 и 6.8) при относительно повышенных величинах Eu/Eu^* (0.8 и 0.9), что предполагает участие в ее составе заметной доли продуктов размытия вулканических пород основного состава, слагающих плато Путорана и прилегающие к нему районы. Современные донные осадки эстуария Енисея имеют значение $(La/Yb)_{Ncp} = 6.7$. Содержания Cr в них варьируют от 78 до 121 г/т, а кобальта – от 17 до 35 г/т.

Взвесь р. Лена, поступающая на шельф восточной части моря Лаптевых, отличается от приведенных примеров существенно более высокой величиной $(La/Yb)_N$, достигающей 12.4, а также незначительным деплетированием ТРЗЭ. Среднее содержание Cr в ней составляет, напротив, всего 66 г/т, а кобальта – 16 г/т, что в 2 раза меньше, чем это характерно для взвеси рек Печора, Енисей и Хатанга. Для взвеси р. Яна, также несущей свои воды в восточную часть моря Лаптевых, характерно значение $(La/Yb)_N$, сопоставимое с величиной данного параметра во взвеси рек Маккензи и Арктик-Ред-Ривер (8.6 и 8.5), поставляющих обломочный материал на шельф моря Бофорта. Параметр Co_{cp} для взвеси рек Яна и Омлой (16 и 17 г/т соответственно) сопо-

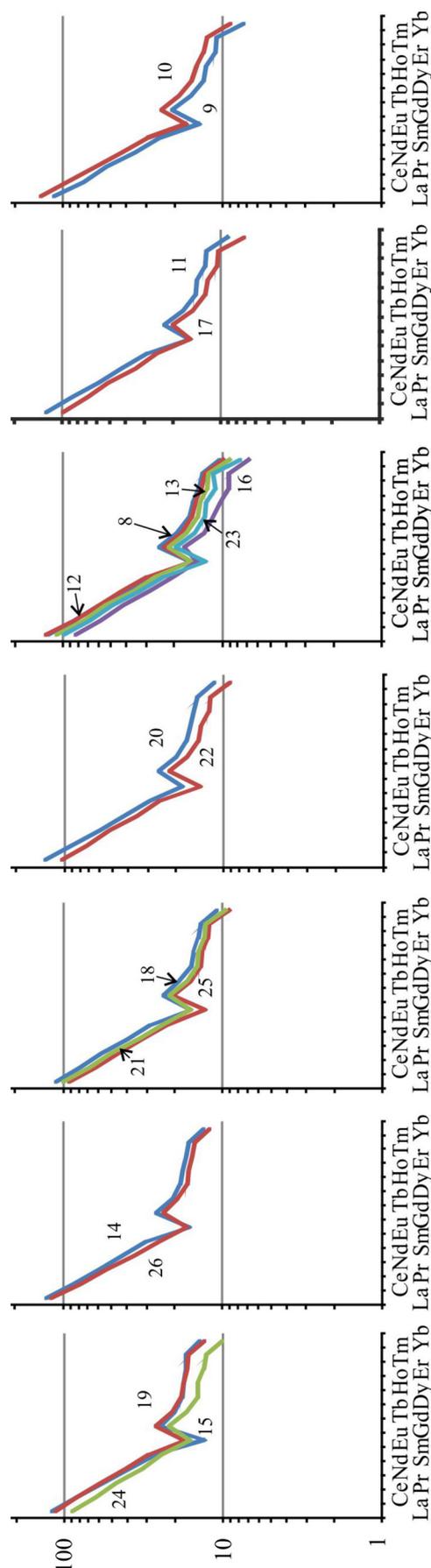


Рис. 2. Нормированные по хондриту спектры распределения РЗЭ в пробах IRS, огнесенных к разным группам по величине $(La/Yb)_N$. Номера проб см. на рис. 1.

Fig. 2. Chondrite normalized REE distribution in the investigated IRS samples, assigned to different groups according to the $(La/Yb)_N$ value. Numbers of samples see Fig. 1.

Таблица 2. Средние, минимальные и максимальные содержания ряда редких и рассеянных элементов в осадочном материале дрейфующих льдов северной части круговорота Бофорта и ряде эталонных объектов, г/т**Table 2.** Average, minimum and maximum content of rare and trace elements in the sedimentary matter from drifting ice in the northern part of the Beaufort Gyre and some reference objects, ppm

Географическая привязка	La	Co	Cr	Ce	Yb
IRS, северная часть круговорота Бофорта	31.9	12.8 ± 2.4 8.7–17.5	75.9 ± 9.1 60.7–91.0	72.7 ± 9.5 54.8–89.8	2.4 ± 0.5 1.7–3.4
Р. Печора (восток Баренцева моря)	29.1	33	107	53.4	–
Р. Обь, центр Карского моря	31.7 ± 3.0 27.6–37.2	22	95	64	2.4
Эстуарий р. Обь	22.7	21.1 ± 3.4 15.5–27.8	95.8 ± 8.8 83.0–112.0	60.3 ± 4.9 53.6–68.2	2.7 ± 0.3 2.3–3.1
Р. Енисей, восток Карского моря	27.2 ± 3.5 20.8–33.8	34	102	47.6	2.3
Эстуарий р. Енисей	22	27.7 ± 4.3 17.2–35.7	109.2 ± 9.5 78.0–121.0	52.9 ± 5.7 43.9–65.2	2.7 ± 0.3 2.3–3.4
Р. Хатанга, запад моря Лаптевых	44	35	–	48	2.2
Р. Лена, восток моря Лаптевых	27	16	66	95	2.4
Р. Омолуй, восток моря Лаптевых	31	16	–	61	2.3
Р. Яна, восток моря Лаптевых		17	–	68	2.4
Восток Восточно-Сибирского моря	20.1 ± 4.2 10.0–25.0	11.9 ± 6.0 5.0–34.0	74.3 ± 13.6 31.0–106.0	–	1.9 ± 0.3 1.2–2.7
Чукотское море	26.0 ± 5.1 19.0–35.0	12.0 ± 5.7 1.0–27.0	73.1 ± 19.0 24.0–92.0	–	2.2 ± 0.5 0.9–3.7
Р. Маккензи	31.4	14	83	61.2	2.5
Дельта р. Маккензи	31.5 ± 8.2 16.0–44.0	16.0 ± 3.2 9.0–22.0	105.9 ± 21.0 67.0–142.0	68.8 ± 18.9 27.0–97.0	–
Р. Арктик-Ред-Ривер	34.1	14.3	93.8	66.2	2.7
Канадский щит	32	12	35	65	1.5
Фанерозойские граниты	40	3	8	94	3.2
Мезокайнозойские андезиты	20	22	48	44	2
Мезокайнозойские базальты	11	35	150	27	2.7
Протерозойские граниты	48	5.5	18	115	3.5
РААС	38	23	110	80	2.8

Примечание. В числителе – среднее арифметическое и стандартное отклонение, в знаменателе – минимальное и максимальное содержание. Прочерк – данные отсутствуют.

Note. In numerator – average arithmetic and standard deviation, in denominator – minimal and maximum contents. Dash – data absents.

ставим со средним содержанием этого элемента во взвеси р. Лена.

В осадках восточной части Восточно-Сибирского моря содержание хрома варьирует от 31 до 106 г/т при средней величине 74 ± 14 г/т (Астахов и др., 2013; Колесник, 2015). В то же время среднее содержание Со составляет здесь всего $\approx 70\%$ от содержания его во взвеси рек Лена, Яна и Омолуй. Примерно такие же средние концентрации названных элементов характерны и для осадков Чукотского моря. Среднее значение $(La/Yb)_N$ для современных донных осадков восточной части Восточно-Сибирского моря равно 7.5, а для осадков Чукотского моря указанный параметр несколько выше – 8.2 (минимум 6.4, максимум 14.3). Примечательно, что значения $(La/Yb)_N$ в индивидуальных пробах, отобранных на востоке Восточно-Сибирского моря, варьируют от 2.9 до 11.3. Это позволяет считать, что существенной гомогенизации состава современных донных осадков на шельфе Восточно-

Сибирского моря все еще не произошло, а состав источников обломочного материала в значительной мере варьирует.

Взвесь р. Маккензи – основной водной артерии, питающей взвешенным материалом шельф моря Бофорта, содержит ≈ 14 г/т Со и ≈ 83 г/т Cr; сходные средние концентрации кобальта и хрома присутствуют и во взвеси р. Арктик-Ред-Ривер, берущей начало в северной части гор Маккензи и впадающей в р. Маккензи в 25 км выше дельты последней. В дельте р. Маккензи средние концентрации названных элементов несколько иные – 16 ± 3 г/т (минимум 9, максимум 22 г/т) и 105 ± 21 г/т (минимум 67, максимум 142 г/т) (Vonk et al., 2015). Величины $(La/Yb)_N$, рассчитанные для взвеси рек Маккензи и Арктик-Ред-Ривер составляют 8.6 и 8.5 (Савенко, 2006). К сожалению, в работе (Vonk et al., 2015) данные о содержаниях La в осадках разных микрофаций дельты р. Маккензи есть, а сведения о концентрации Yb отсутствуют, поэтому проанализировать

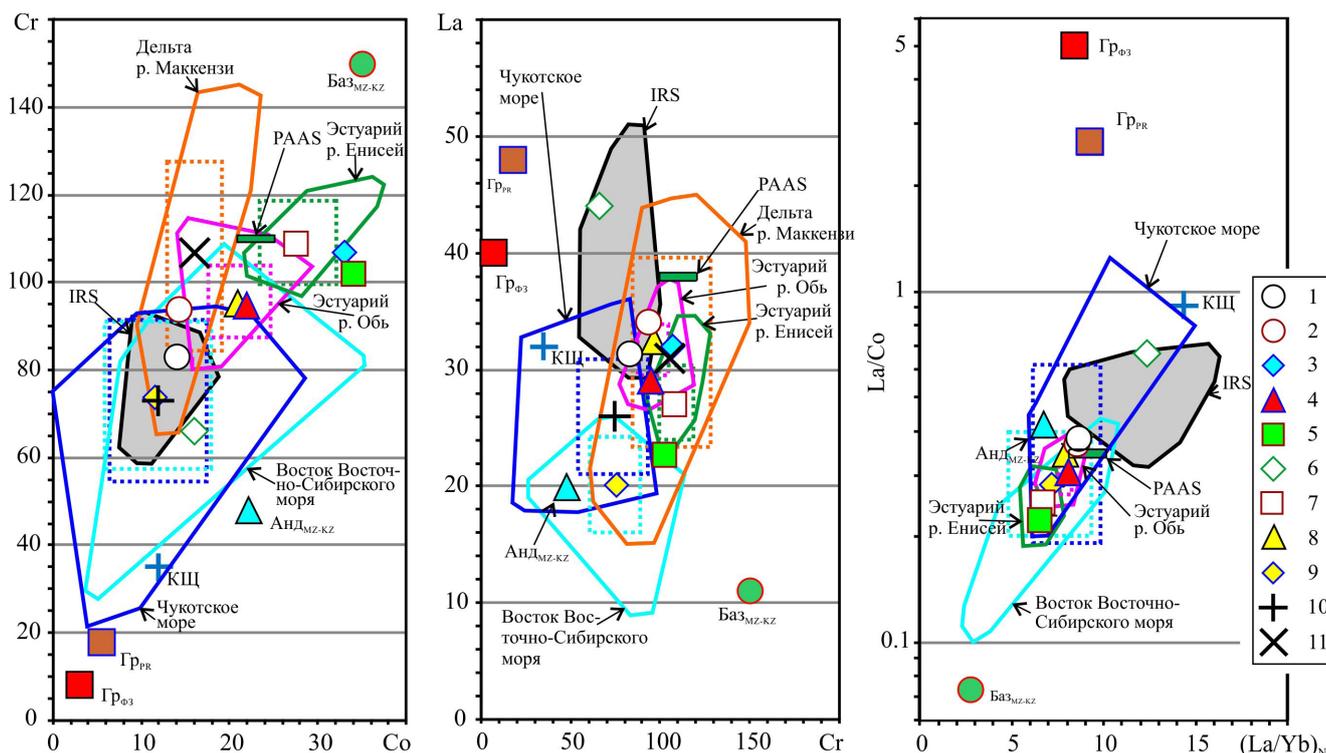


Рис. 3. Положение полей состава IRS, взвеси ряда арктических рек и современных донных осадков некоторых морей Северного Ледовитого океана на диаграммах Co–Cr, Cr–La и $(La/Yb)_N$ –La/Co.

1 – взвесь р. Маккензи (среднее); 2 – то же, р. Арктик-Ред-Ривер; 3 – то же, р. Печора; 4 – то же, р. Обь; 5 – то же, р. Енисей; 6 – то же, р. Лена; 7 – то же, эстуарий р. Енисей; 8 – то же, эстуарий р. Обь; 9 – современные донные осадки, восток Восточно-Сибирского моря (среднее); 10 – то же, Чукотское море; 11 – дельта р. Маккензи, осадки разных микрофаций (среднее); данные по содержанию химических элементов взяты из работ (Нестерова, 1960; Коновалов и др., 1966; Морозов и др., 1974; Лисицын и др., 1980; Шевченко и др., 2002; Савенко и др., 2004; Савенко, 2006; Асадулин и др., 2013; Астахов и др., 2013; Колесник, 2015; Lisitzin, Shevchenko, 2016; Gordeev, Shevchenko, 1995; Rachold et al., 1996; Rachold, 1999; Gaillardet et al., 1999; Chen et al., 2003; Vonk et al., 2015).

IRS – осадочный материал из дрейфующих льдов северной части круговорота Бофорта; эстуарий р. Енисей – поле индивидуальных проб современных донных осадков; эстуарий р. Обь – то же; восток Восточно-Сибирского моря – то же; Чукотское море – то же; дельта р. Маккензи – поле индивидуальных проб осадков разных микрофаций; Канадский щит – точка среднего состава кристаллических комплексов; $Гр_{Фз}$ – фанерозойские граниты; $Анд_{МЗ-КЗ}$ – мезо-кайнозойские андезиты; $Баз_{МЗ-КЗ}$ – то же, базальты; $Гр_{PR}$ – протерозойские гранитоиды; PAAS – постархейский австралийский средний глинистый сланец. Прямоугольники, обозначенные пунктирными линиями разного цвета, соответствуют среднему арифметическому значению \pm стандартное отклонение для полей, образованных сплошными линиями того же цвета.

Fig. 3. Position of the investigated IRS samples, suspended matter of Arctic rivers and modern bottom sediments of some seas of the Arctic Ocean in the Co–Cr, Cr–La and $(La/Yb)_N$ –La/Co diagrams.

1 – suspended matter, Mackenzie River (mean); 2 – the same, Arctic-Red-River; 3 – the same, Pechora River; 4 – the same, Ob River; 5 – the same, Yenisei River; 6 – the same, Lena River; 7 – the same, Yenisei River Estuary; 8 – suspended matter, Ob River Estuary; 9 – modern bottom sediments, the eastern part of the East-Siberian Sea (mean); 10 – the same, Chukchi Sea; 11 – Mackenzie River Delta, sediments of various microfacies (mean). Analytical data are taken from (Nesterova, 1960; Kononov et al., 1966; Morozov et al., 1974; Lisitzin et al., 1980; Shevchenko et al., 2002; Savenko et al., 2004; Savenko, 2006; Asadulin et al., 2013; Astakhov et al., 2013; Kolesnik, 2015; Lisitzin, Shevchenko, 2016; Gordeev, Shevchenko, 1995; Rachold et al., 1996; Rachold, 1999; Gaillardet et al., 1999; Chen et al., 2003; Vonk et al., 2015).

IRS – sedimentary material from the drifting ice, northern part of the Beaufort Gyre; Yenisei River Estuary – individual data point field of modern bottom sediments; Ob River Estuary – the same; the eastern part of the East-Siberian Sea – the same; Chukchi Sea – the same; Mackenzie River Delta – individual data point field of various microfacies sediments; Canadian Shield – mean composition of the crystalline complexes; $Гр_{Фз}$ – Phanerozoic granites; $Анд_{МЗ-КЗ}$ – Mezo-Cenozoic andesites; $Баз_{МЗ-КЗ}$ – the same, basalts; $Гр_{PR}$ – Proterozoic granitoids; PAAS – post-Archean Australian shale. The boxes marked with dashed lines of different colors represent mean values \pm standard deviation of the field formed by the solid lines of the same color.

пространственные вариации параметра $(La/Yb)_N$ не представляется возможным. Для среднего состава кристаллических комплексов Канадского щита характерны минимальные из всех рассмотренных

нами средние концентрации как кобальта (12 г/т), так и хрома (35 г/т) (Shaw et al., 1967, 1976; Taylor, McLennan, 1985), однако они обладают наибольшей величиной $(La/Yb)_N$ (14.4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Точное положение источников присутствующего во льдах IRS до настоящего времени не установлено. Это обусловлено, с одной стороны, сложным круговоротом льдов в Арктическом бассейне, с другой – относительно небольшим количеством данных собственно о составе IRS, в том числе распределении в нем редких и рассеянных элементов. По представлениям большинства исследователей, основным поставщиком IRS является широкий и мелководный сибирский арктический шельф. В море Бофорта, отличительные особенности которого – существенно более узкий шельф и почти постоянное присутствие льда в летний период, условия для формирования IRS не столь благоприятны (Лисицын, 1994; Lisitzin, 2002; Pfirman et al., 1990; Eicken et al., 1997; Reimnitz et al., 1994).

Для реконструкции положения источников и путей перемещения IRS традиционно используется исследование минералогии различных фракций IRS и донных осадков (Dethleff, Kuhlmann, 2010), изучение радиогенных изотопов (Farmer et al., 2006; Verplanck et al., 2009), Ar-Ar возрастов (Hemming et al., 2002), магнитных характеристик минералов (Pirring et al., 2002; Darby, 2003; Andrews, Hardardottir, 2009) и ряд других подходов. Так, исследование тяжелых минералов в осадках шельфа моря Лаптевых (Behrends et al., 1996) показало преобладание в его западной части клинопироксена, поступающего в эту часть акватории предположительно вследствие разрушения комплексов пород Северной Земли и Таймыра. В восточной части моря Лаптевых доминирует амфибол, поставляемый реками Лена и Яна с Сибирского нагорья. В публикации (Darby, 2003) проанализирован состав оксидов железа в IRS западной части Арктики. Полученные результаты подтвердили ведущую роль восточной части моря Лаптевых как источника значительной части дрейфующих арктических льдов и IRS в них. В то же время были отмечены и новые черты в перемещении льда (например, так называемый “русский лед” был зафиксирован в море Бофорта вблизи Аляски), а также новые источники IRS (шельф о-ва Банкс).

Если условно считать, что распределение редких и рассеянных элементов в речной взвеси в той или иной форме “транслируется” в формирующиеся за ее счет современные шельфовые осадки, то из сопоставления средних содержаний хрома и кобальта во взвеси рек Печора, Обь, Енисей, Лена и Маккензи с концентрациями их в донных осадках Баренцева, Восточно-Сибирского и Чукотского морей, а также морей Лаптевых и Бофорта можно сделать вывод, что источниками IRS для дрейфующих льдов в северной части круговорота Бофорта с существенной долей вероятности могли быть восточные районы моря Лаптевых, а также шельфы

Восточно-Сибирского (преимущественно также восточная его часть) и Чукотского морей, и шельф моря Бофорта.

Вариации $(La/Yb)_N$ в IRS из северной части круговорота Бофорта характеризуются достаточно широким коридором значений (8.5–15.5). Они в полной мере соответствуют как средней величине данного параметра во взвеси рек Маккензи и Арктик-Ред-Ривер (8.6 и 8.5), так и среднему значению $(La/Yb)_N$ для кристаллических образований Канадского щита (14.4). В этот же диапазон укладываются величины $(La/Yb)_N$ для взвеси рек Яны и Лены (8.7 и 12.4), что с учетом представлений (Darby, 2003) может указывать на возможность присутствия в IRS из района Северного полюса и осадочного материала, заимствованного на шельфе восточной части моря Лаптевых. Для западной части этого же моря одним из источников обломочного материала является р. Хатанга, дренирующая на значительном протяжении базальты и ассоциирующие с ними породы плато Путорана. Средняя величина $(La/Yb)_N$ в ее взвеси составляет ≈ 6.7 при $Eu/Eu^*_{cp} = 0.86$. Это позволяет исключить из числа возможных источников IRS в исследованных нами пробах как западные районы моря Лаптевых, так и восточную часть Карского моря, так как последняя получает громадный объем взвеси р. Енисей, для которой среднее значение $(La/Yb)_N$, как и для р. Хатанга, весьма низко (≈ 6.6).

В целом по соотношению La и Cr, Cr и Co, а также таких параметров, как $(La/Yb)_N$ и La/Co , взвесь северных рек и современные донные осадки арктических морей характеризуются микроэлементным составом, промежуточным между средними составами мезо-кайнозойских базальтов и гранитоидов протерозоя и фанерозоя (рис. 3); сопоставимы они и с составом PAAS. Такая ситуация характерна для подавляющего большинства постаршейских тонкозернистых обломочных пород (Taylor, McLennan, 1985; Маслов и др., 2008). Если проанализировать расположение полей составов тех и других на диаграммах Co–Cr, Cr–La и $(La/Yb)_N$ – La/Co , то мы увидим, что оно в существенной степени различно. Например, на диаграмме Co–Cr не наблюдается перекрытия полей составов современных донных осадков эстуария р. Енисей, с одной стороны, и восточной части Восточно-Сибирского и Чукотского морей, с другой, а осадки дельты р. Маккензи хотя и сопоставимы с осадками эстуария р. Енисей по содержанию хрома, но отличаются от них заметно более низким содержанием кобальта. Иная ситуация присуща осадкам эстуария р. Обь. Поле IRS из льдов северной части круговорота Бофорта на этой диаграмме имеет 100%-е перекрытие с полями состава современных донных осадков востока Восточно-Сибирского и Чукотского морей, а также обладает заметным перекрытием с полем осадков дельты р. Маккензи. На диаграмме Cr–La IRS зани-

мает в существенной степени обособленное положение, обладая тем не менее определенным перекрытием с полями осадков Чукотского моря и дельты р. Маккензи. В поле IRS здесь попадает средняя точка состава взвеси р. Лена, а также аналогичные точки рек Маккензи и Арктик-Ред-Ривер. Недалеко от этого поля расположена и средняя точка состава кристаллических комплексов Канадского щита. На диаграмме $(La/Yb)_N-La/Co$ поле состава IRS имеет примерно 50%-е перекрытие с полем состава современных донных осадков Чукотского моря. К нему тяготеет и средняя точка взвеси р. Лена, а точка Канадского щита расположена относительно недалеко, как и точки взвеси рек Маккензи и Арктик-Ред-Ривер и PAAS. Перекрытия полей IRS и современных донных осадков эстуариев рек Обь и Енисей, а также востока Восточно-Сибирского моря, напротив, не наблюдается.

Все сказанное подтверждает, на наш взгляд, сделанный вывод о присутствии в составе IRS из района Северного полюса осадочного материала, заимствованного как на шельфе моря Бофорт, так и на шельфах восточной части моря Лаптевых и Чукотского моря. Вклад эолового материала, выпадающего из атмосферы на дрейфующие льды, вероятно, незначителен. Однако, в силу существенной ограниченности данных по распределению широкого спектра редких и рассеянных элементов в IRS и современных донных осадках арктических морей, этот вывод все еще имеет статус предварительного.

Авторы благодарны экипажу НИС "Поларштерн", А.А. Голикову, С.С. Драчеву, В.Т. Соколову, Е.Е. Мусатову, W. Yokat, J. Hefter, C. Müller, K. Polozek, C. Rödle, R. Usbeck, M.-K. Yoon за помощь в отборе проб, Д.Ю. Сапожникову за выполнение нейтронно-активационного анализа, Н.С. Глушковой за подготовку рисунков к статье.

Исследования проведены в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0149-2016-0001) и при финансовой поддержке проекта УрО РАН № 15-15-5-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асадулин Э.Э., Мирошников А.Ю., Величкин В.И. (2013) Геохимическая специализация донных осадков в зонах смещения вод Оби и Енисея с водами Карского моря. *Геохимия*, (12), 1116-1129.
- Астахов А.С., Ван Р., Крэйн К., Иванов М.В., Айгуо Г. (2013) Литохимическая типизация обстановок полярного осадконакопления (Чукотское море) методами многокомпонентного статистического анализа. *Геохимия*, (4), 303-325.
- Колесник А.Н. (2015) Геохимические особенности современного осадконакопления в Чукотском море. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 142 с.
- Колесов Г.М. (1994) Определение микроэлементов. Нейтронно-активационный анализ в геохимии и космохимии. *Журнал аналитической химии*, **49**(1), 160-171.
- Коновалов Г.С., Иванова А.А., Колесникова Т.Х. (1966) Микроэлементы в воде и во взвешенных веществах Азиатской территории СССР. *Гидрохим. матер.*, **42**, 112-123.
- Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р. (2007) Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики в течение последних 130 тыс. лет. М.: ГЕОС, 404 с.
- Левитан М.А., Сыромятников К.В., Кузьмина Т.Г. (2012) Некоторые литолого-геохимические особенности современной и четвертичной седиментации в Северном Ледовитом океане. *Геохимия*, (7), 627-643.
- Лисицын А.П. (1978) Процессы океанской седиментации. Литология и геохимия. М.: Наука, 392 с.
- Лисицын А.П. (1994) Ледовая седиментация в Мировом океане. М.: Наука, 448 с.
- Лисицын А.П. (2010) Новый тип седиментогенеза в Арктике – ледовый морской: новые подходы к исследованию процессов. *Геология и геофизика*, **51**(1), 18-60.
- Лисицын А.П., Гурвич Е.Г., Лукашин В.Н., Емельянов Е.М., Зверинская И.Б., Куринов А.Д. (1980) Геохимия элементов-гидролизатов. М.: Наука, 238 с.
- Маслов А.В., Ножкин А.Д., Подковыров В.Н., Летникова Е.Ф., Туркина О.М., Гражданкин Д.В., Дмитриева Н.В., Ишерская М.В., Крупенин М.Т., Ронкин Ю.Л., Гареев Э.З., Вещева С.В., Лепихина О.П. (2008) Геохимия тонкозернистых терригенных пород верхнего докембрия Северной Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 274 с.
- Морозов Н.П., Батурин Г.Н., Гордеев В.В., Гурвич Е.Г. (1974) О составе взвесей и осадков устьевых районов Северной Двины, Мезени, Печоры и Оби. *Гидрохим. матер.*, **60**, 60-73.
- Нестерова И.Л. (1960) Химический состав взвесей и растворенных веществ реки Оби. *Геохимия*, (4), 355-361.
- Савенко В.С. (2006) Химический состав взвешенных наносов рек мира. М.: ГЕОС, 174 с.
- Савенко В.С., Покровский О.С., Дюпре Б., Батурин Г.Н. (2004) Химический состав взвешенного вещества крупных рек России и сопредельных стран. *Докл. АН*, **398**(1), 97-101.
- Шевченко В.П., Лисицын А.П., Полякова Е.И., Детлеф Д., Серова В.В., Штайн Р. (2002) Распределение и состав осадочного материала в снежном покрове дрейфующих льдов Арктики (пролив Фрама). *Докл. АН*, **383**(3), 385-389.
- Шевченко В.П., Маслов А.В., Штайн Р. (2015) Распределение редких и рассеянных элементов в осадочном материале, переносимом дрейфующими льдами над плато Ермак, Арктика. *Геология морей и океанов. Мат-лы XXI междунар. науч. конф. (Школы) по морской геологии*. (Ред.: А.П. Лисицын, Н.В. Политова, В.П. Шевченко). IV. М.: ГЕОС, 337-341.
- Шевченко В.П., Маслов А.В., Штайн Р. (2016) Распределение ряда редких и рассеянных элементов в осадочном материале, переносимом дрейфующими льдами в районе плато Ермак, Северный Ледовитый океан. *Океанология*, **57**, В печати.
- Шевченко В.П., Северина О.В., Майорова Н.Г., Иванов Г.В. (1996) Количественное распределение и состав взвеси в эстуариях Оби и Енисея. *Вестн. Моск.*

- ун-та. Сер. 4. Геология, (3), 81-86.
- Andrews J.T., Hardardottir J. (2009) A comparison of Holocene sediment- and paleomagnetic characteristics from the margins of Iceland and East Greenland. *Jokull*, **59**, 51-66.
- ARCTIC'98: The Expedition ARK-XIV/1a of RV "Polarstern" in 1998 (1999) Ed. W. Jokat. *Ber. Polarforsch.*, **308**, 159 p.
- Behrends M., Peregovich B., Stein R. (1996) Terrigenous sediment supply into the Arctic Ocean: Heavy-mineral distribution in the Laptev Sea. *Ber. Polarforsch.*, **212**, 37-42.
- Chen Z., Gao A., Liu Y., Sun H., Shi X., Yang Z. (2003) REE geochemistry of surface sediments in the Chukchi Sea. *Science in China. Series D: Earth Sciences*, **46**(6), 603-611.
- Condie K.C. (1993) Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chem. Geol.*, **104**, 1-37.
- Cullers R.L. (2000) The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: Implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos*, **51**, 305-327.
- Cullers R.L., Basu A., Suttner L.J. (1988) Geochemical signature of provenance in sand size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root batholith, Montana, USA. *Chem. Geol.*, **70**, 335-348.
- Cullers R.L., Podkovyrov V.N. (2002) The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic Uj group, southeastern Russia. *Precam. Res.*, **117**, 157-183.
- Darby D.A. (2003) Sources of sediment found in sea ice from the western Arctic Ocean, new insights into processes of entrainment and drift patterns. *J. Geophys. Res.*, **108**(C8), 3257, doi:10.1029/2002JC001350.
- Dethleff D., Kuhlmann G. (2010) Fram Strait sea-ice sediment provinces based on silt and clay compositions identify Siberian Kara and Laptev seas as main source areas. *Polar Res.*, **29**, 265-282.
- Eicken H., Reimnitz E., Alexandrov V., Martin T., Kassens H., Viehoff T. (1997) Sea-ice processes in the Laptev Sea and their importance for sediment export. *Cont. Shelf Res.*, **17**, 205-233.
- Farmer G.L., Licht K., Swope R.J., Andrews J.T. (2006) Isotopic constraints on the provenance of fine-grained sediment in LGM tills from the Ross Embayment, Antarctica. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **249**, 90-107.
- Gaillardet J., Dupre B., Allegre C.J. (1999) Geochemistry of large river suspended sediments: silicate weathering or recycling tracer? *Geochim. Cosmochim. Acta*, **63**(23/24), 4037-4052.
- Gordeev V.V., Shevchenko V.P. (1995) Chemical composition of suspended sediments in the Lena River and its mixing zone. *Ber. Polarforsch.*, **176**, 154-169.
- Gordeev V.V., Beeskov B., Rachold V. (2007) Geochemistry of the Ob and Yenisey estuaries: A comparative study. *Ber. Polarforsch.*, **565**, 235 p.
- Hemming S.R., Vorren T.O., Kleman J. (2002) Provenance of ice rafting in the North Atlantic: Application of ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of individual ice rafted hornblende grains. *Quat. Int.*, **95-96**, 75-85.
- Lisitzin A.P. (2002) Sea-ice and iceberg sedimentation in the Ocean: recent and past. Berlin, Springer, 2002. 563 p.
- Lisitzin A.P., Shevchenko V.P. (2016) Glacial-marine sedimentation. *Encyclopedia of Marine Geosciences*. (Eds J. Harff, M. Meschede, S. Petersen, J. Thiede). Dordrecht: Springer Science + Business Media, 288-294.
- Martin J.M., Meybeck M. (1979) Chemical composition of river-borne particulates. *Marine Chem.*, **7**(2), 193-206.
- McLennan S.M. (2001) Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **2**, paper 2000GC000109, 24 p.
- Meese D.A., Reimnitz E., Tucker III W.B., Gow A.J., Bischof J., Darby D. (1997) Evidence for radionuclide transport by sea ice. *The Science of the Total Environment*, **202**, 267-278.
- Nürnberg D., Wollenburg I., Dethleff D., Eicken H., Kassens H., Letzig T., Reimnitz E., Thiede J. (1994) Sediments in Arctic sea ice: Implications for entrainment, transport and release. *Marine Geology*, **119**, 185-214.
- Pfirman S., Lange M.A., Wollenburg I., Schlosser P. (1990) Sea ice characteristics and the role of sediment inclusions in deep-sea deposition: Arctic-Antarctic comparisons. *Geological history of the Polar Oceans: Arctic versus Antarctic*. (Eds U. Bleil, J. Thiede). Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 187-211.
- Pirrung M., Futterer D., Grobe H., Matthiessen J., Nissen F. (2002) Magnetic susceptibility and ice-rafted debris in surface sediments of the Nordic Seas: Implications for Isotope Stage 3 oscillations. *Geo-Marine Letters*, **22**, 1-11.
- Puy-Alquiza M.J., Miranda-Aviles R., Cruz-Cruz M., Pérez-Arbizu O., Vega-González M., Ana-Zanor G. (2014) Geochemistry and depositional environment of the Lose-ro Formation in the Mesa Central, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **66**, 413-430.
- Rachold V. (1999) 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*. Berlin, Springer-Verlag, 199-222.
- Rachold V., Alabyan A., Hubberten H.-W., Korotaev V.N., Zaitsev A.A. (1996) Sediment transport to the Laptev Sea – hydrology and geochemistry of the Lena River. *Polar Res.*, **15**(2), 183-196.
- Reimnitz E., Dethleff D., Nürnberg D. (1994) Contrasts in Arctic shelf sea-ice regimes and some implications: Beaufort Sea versus Laptev Sea. *Marine Geology*, **119**, 215-225.
- Shaw D.M., Reilly G.A., Muysson J.R., Pattenden G.E., Campbell F.E. (1967) An estimate of the chemical composition of the Canadian Precambrian shield. *Can. J. Earth Sci.*, **4**, 829-853.
- Shaw D.M., Dostal J., Keays R.R. (1976) Additional estimates of continental surface Precambrian shield composition in Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **40**, 73-83.
- Stein R. (2008) Arctic Ocean sediments: processes, proxies and paleoenvironment. *Developments in marine geology*. 2nd ed. Amsterdam, Elsevier, 592 p.
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) The Continental Crust: Its composition and evolution. London, Blackwell, 320 p.
- Verplanck E.P., Farmer G.L., Andrews J., Dunhil, G., Millo C. (2009) Provenance of Quaternary glacial and glacial marine sediments along the southeast Greenland margin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **286**, 52-62.
- Viscusi-Shirley C. (2001) Siberian-Arctic Shelf Surface-Sediments: Sources, Transport Pathways and Processes, and Diagenetic Alteration. A dissertation Doctor of Philosophy in Oceanography submitted to Oregon State

University. 178 p.

- Viscosi-Shirley C., Pisias N., Mammone K. (2003) Sediment source strength, transport pathways and accumulation patterns on the Siberian–Arctic’s Chukchi and Laptev shelves. *Cont. Shelf Res.*, **23**, 1201-1225.
- Vonk J.E., Giosan L., Blusztajn J., Montlucon D., Pannatier E.G., McIntyre C., Wacker L., Macdonald R.W., Yunker M.B., Eglinton T.I. (2015) Spatial variations in geochemical characteristics of the modern Mackenzie Delta sedimentary system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **171**, 100-120.

REFERENCES

- Andrews J.T., Hardardottir J. (2009) A comparison of Holocene sediment- and paleomagnetic characteristics from the margins of Iceland and East Greenland. *Jokull*, **59**, 51-66.
- ARCTIC’98: The Expedition ARK-XIV/1a of RV “Polarstern” in 1998 (1999) Ed. W. Jokat. *Ber. Polarforsch.*, **308**, 159 p.
- Asadulin E.E., Miroshnikov A.Yu., Velichkin V.I. (2013) Geochemical signature of bottom sediments in the mixing zones of Ob and Yenisei waters with Kara Sea water. *Geochemistry International*, **51**(12), 1005-1018.
- Astakhov A.S., Wang Rujian, Crane K., Ivanov M.V., Aiguo Gao. (2013) Lithochemical classification of the Arctic depositional environment (Chukchi Sea) by methods of multivariate. *Geochemistry International*, **51**(4), 269-289.
- Behrends M., Peregovich B., Stein R. (1996) Terrigenous sediment supply into the Arctic Ocean: Heavy-mineral distribution in the Laptev Sea. *Ber. Polarforsch.*, **212**, 37-42.
- Chen Z., Gao A., Liu Y., Sun H., Shi X., Yang Z. (2003) REE geochemistry of surface sediments in the Chukchi Sea. *Science in China. Series D: Earth Sciences*, **46**(6), 603-611.
- Condie K.C. (1993) Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chem. Geol.*, **104**, 1-37.
- Cullers R.L. (2000) The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: Implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos*, **51**, 305-327.
- Cullers R.L., Basu A., Suttner L.J. (1988) Geochemical signature of provenance in sand size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root batholith, Montana, USA. *Chem. Geol.*, **70**, 335-348.
- Cullers R.L., Podkovyrov V.N. (2002) The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic U1 group, southeastern Russia. *Precam. Res.*, **117**, 157-183.
- Darby D.A. (2003) Sources of sediment found in sea ice from the western Arctic Ocean, new insights into processes of entrainment and drift patterns. *J. Geophys. Res.*, **108**(C8), 3257, doi:10.1029/2002JC001350.
- Dethleff D., Kuhlmann G. (2010) Fram Strait sea-ice sediment provinces based on silt and clay compositions identify Siberian Kara and Laptev seas as main source areas. *Polar Res.*, **29**, 265-282.
- Eicken H., Reimnitz E., Alexandrov V., Martin T., Kassens H., Viehoff T. (1997) Sea-ice processes in the Laptev Sea and their importance for sediment export. *Cont. Shelf Res.*, **17**, 205-233.
- Farmer G.L., Licht K., Swope R.J., Andrews J.T. (2006) Isotopic constraints on the provenance of fine-grained sediment in LGM tills from the Ross Embayment, Antarctica. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **249**, 90-107.
- Gaillardet J., Dupre B., Allegre C.J. (1999) Geochemistry of large river suspended sediments: silicate weathering or recycling tracer? *Geochim. Cosmochim. Acta*, **63**(23/24), 4037-4052.
- Gordeev V.V., Beeskov B., Rachold V. (2007) Geochemistry of the Ob and Yenisey estuaries: A comparative study. *Ber. Polarforsch.*, **565**, 235 p.
- Gordeev V.V., Shevchenko V.P. (1995) Chemical composition of suspended sediments in the Lena River and its mixing zone. *Ber. Polarforsch.*, **176**, 154-169.
- Hemming S.R., Vorren T.O., Kleman J. (2002) Provinci-ality of ice rafting in the North Atlantic: Application of ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of individual ice rafted hornblende grains. *Quat. Int.*, **95-96**, 75-85.
- Kolesnik A.N. (2015) *Geokhimicheskie osobennosti sovremennogo osadkonakopleniya v Chukotskom more* [Geochemical peculiarities of modern sedimentation in the Chukchi Sea]. Cand. geol. and min sci. diss. Vladivostok, Tikhookeanskii Okeanologicheskii Institut, Far East Branch of RAS, 142 p. (In Russian)
- Kolesov G.M. (1994) Determination of microelements. Neutron-activation analysis in geochemistry and cosmochemistry. *Zh. Anal. Khim.*, **49**(1), 160-171. (In Russian)
- Konovalov G.S., Ivanova A.A., Kolesnikova T.Kh. (1966) Microelements in water and in suspended particulate matter of Asian territory of USSR. *Gidrokhimicheskie materialy*, **42**, 112-123. (In Russian)
- Levitan M.A., Lavrushin Yu.A., Stein R. (2007) *Ocherki istorii sedimentatsii v Severnom Ledovitom okeane i moryakh Subarktiki v techenie poslednikh 130 tys. let* [Outlines of the evolution of sedimentation in the Arctic Ocean and subarctic seas for the last 130 thousand years]. Moscow, GEOS Publ., 404 p. (In Russian)
- Levitan M.A., Syromyatnikov K.V., Kuz'mina T.G. (2012) Lithological and geochemical characteristics of recent and Quaternary sedimentation in the Arctic Ocean. *Geochemistry International*, **50**(7), 559-573.
- Lisitzin A.P. (1978) *Protsessy okeanskoj sedimentatsii. Litologiya i geokhimija* [Processes of oceanic sedimentation. Lithology and geochemistry]. Moscow, Nauka Publ., 392 p. (In Russian)
- Lisitzin A.P. (1994) *Ledovaya sedimentatsiya v Mirovom okeane* [Ice-rafted sedimentation in the World Ocean]. Moscow, Nauka Publ., 448 c. (In Russian)
- Lisitzin A.P. (2002) Sea-ice and iceberg sedimentation in the Ocean: recent and past. Berlin, Springer, 2002. 563 p.
- Lisitzin A.P. (2010) Marine ice-rafting as a new type of sedimentogenesis in the Arctic and novel approaches to studying sedimentary processes. *Russian Geology and Geophysics*, **51**(1), 12-47.
- Lisitzin A.P., Gurvich E.G., Lukashin V.N., Emelyanov E.M., Zverinskaya I.B., Kurinov A.D. *Geokhimija elementov-gidrolizatov* [Geochemistry of elements-hydrolyzates]. Moscow: Nauka Publ., 1980. 238 p. (In Russian)
- Lisitzin A.P., Shevchenko V.P. (2016) Glacial-marine sedimentation. *Encyclopedia of Marine Geosciences*. (Eds J. Harff, M. Meschede, S. Petersen, J. Thiede). Dordrecht: Springer Science + Business Media, 288-294.
- Martin J.M., Meybeck M. (1979) Chemical composition of river-borne particulates. *Marine Chem.*, **7**(2), 193-206.
- Maslov A.V., Nozhkin A.D., Podkovyrov V.N., Letnikova E.F., Turkina O.M., Grazhdankin D.V., Dmitrieva N.V., Isherskaya M.V., Krupenin M.T., Ronkin Yu.L., Gareev E.Z., Veshcheva S.V., Lepikhina O.P. (2008)

- Geokhimiya tonkozernistykh terrigennykh porod verkhnego dokembriya Severnoj Evrazii* [Geochemistry of fine-grained terrigenous rocks of Northern Eurasia upper Precambrian]. Ekaterinburg, UB RAS Publ., 274 p. (In Russian)
- McLennan S.M. (2001) Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **2**, paper 2000GC000109, 24 p.
- Meese D.A., Reimnitz E., Tucker III W.B., Gow A.J., Bischof J., Darby D. (1997) Evidence for radionuclide transport by sea ice. *The Science of the Total Environment*, **202**, 267-278.
- Morozov N.P., Baturin G.N., Gordeev V.V., Gurvich E.G. (1974) About composition of suspended matter and sediments of mouth zones of Severnaya Dvina, Mezen', Pechora and Ob' rivers. *Gidrokhimicheskie materialy*, **60**, 60-73. (In Russian)
- Nesterova I.L. (1960) Chemical composition of the suspended and dissolved loads of the Ob river. *Geochemistry International*, (4), 424-431.
- Nürnberg D., Wollenburg I., Dethleff D., Eicken H., Kassens H., Letzig T., Reimnitz E., Thiede J. (1994) Sediments in Arctic sea ice: Implications for entrainment, transport and release. *Marine Geology*, **119**, 185-214.
- Pfirman S., Lange M.A., Wollenburg I., Schlosser P. (1990) Sea ice characteristics and the role of sediment inclusions in deep-sea deposition: Arctic-Antarctic comparisons. *Geological history of the Polar Oceans: Arctic versus Antarctic*. (Eds U. Bleil, J. Thiede). Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 187-211.
- Pirring M., Futterer D., Grobe H., Matthiessen J., Nielsen F. (2002) Magnetic susceptibility and ice-rafted debris in surface sediments of the Nordic Seas: Implications for Isotope Stage 3 oscillations. *Geo-Marine Letters*, **22**, 1-11.
- Puy-Alquiza M.J., Miranda-Aviles R., Cruz-Cruz M., Pérez-Arbizu O., Vega-González M., Ana-Zanor G. (2014) Geochemistry and depositional environment of the Lose-ro Formation in the Mesa Central, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **66**, 413-430.
- Rachold V. (1999) 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*. Berlin, Springer-Verlag, 199-222.
- Rachold V., Alabyan A., Hubberten H.-W., Korotaev V.N., Zaitsev A.A. (1996) Sediment transport to the Laptev Sea – hydrology and geochemistry of the Lena River. *Polar Res.*, **15**(2), 183-196.
- Reimnitz E., Dethleff D., Nürnberg D. (1994) Contrasts in Arctic shelf sea-ice regimes and some implications: Beaufort Sea versus Laptev Sea. *Marine Geology*, **119**, 215-225.
- Savenko V.S. (2006) *Khimicheskii sostav vzheshennykh nanosov rek mira* [Chemical composition of World river's suspended matter]. Moscow, GEOS Publ., 174 p. (In Russian)
- Savenko V.S., Pokrovskii O.S., Dupré B., Baturin G.N. (2004) Chemical composition of suspended material in large rivers of Russia and adjacent countries. *Doklady Earth Sciences*, **398**(7), 938-942.
- Shaw D.M., Dostal J., Keays R.R. (1976) Additional estimates of continental surface Precambrian shield composition in Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **40**, 73-83.
- Shaw D.M., Reilly G.A., Muyssson J.R., Pattenden G.E., Campbell F.E. (1967) An estimate of the chemical composition of the Canadian Precambrian shield. *Can. J. Earth Sci.*, **4**, 829-853.
- Shevchenko V.P., Lisitzin A.P., Polyakova E.I., Dethleff D., Se-rova V.V., Stein R. (2002) Distribution and composition of sedimentary material in the snow cover of Arctic drift ice (Fram Strait). *Doklady Earth Sciences*, **383A**(3), 278-281.
- Shevchenko V.P., Maslov A.V., Stein R. (2015) Distribution of rare and trace elements in ice-rafted sediments in the Yermak Plateau area, the Arctic. *Geologiya morei i okeanov. Materialy XXI International konferentsii po morskoi geologii* [Geology of seas and oceans. Proc. XXI International Conference on Marine Geology]. **IV**. (Eds A.P. Lisitzin, N.V. Politova, V.P. Shevchenko). Moscow, GEOS Publ., 337-341. (In Russian)
- Shevchenko V.P., Maslov A.V., Stein R. (2017) Distribution of some trace elements in ice-rafted sediments in the area of Yermak Plateau, the Arctic Ocean. *Oceanology*, **57**(in press).
- Shevchenko V.P., Severina O.V., Majorova N.G., Ivanov G.V. (1996) The quantitative distribution and composition of suspended matter in the estuaries of the Ob' and the Yenisey. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya Geologiya*, (3), 81-85.
- Stein R. (2008) Arctic Ocean sediments: processes, proxies and paleoenvironment. *Developments in marine geology*. 2nd ed. Amsterdam, Elsevier, 592 p.
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) *The Continental Crust: Its composition and evolution*. London, Blackwell, 320 p.
- Verplanck E.P., Farmer G.L., Andrews J., Dunhil, G., Millo C. (2009) Provenance of Quaternary glacial and glaci-marine sediments along the southeast Greenland margin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **286**, 52-62.
- Viscosi-Shirley C. (2001) Siberian-Arctic Shelf Surface-Sediments: Sources, Transport Pathways and Processes, and Diagenetic Alteration. A dissertation Doctor of Philosophy in Oceanography submitted to Oregon State University. 178 p.
- Viscosi-Shirley C., Pisias N., Mammone K. (2003) Sediment source strength, transport pathways and accumulation patterns on the Siberian-Arctic's Chukchi and Laptev shelves. *Cont. Shelf Res.*, **23**, 1201-1225.
- Vonk J.E., Giosan L., Blusztajn J., Montlucon D., Pannatier E.G., McIntyre C., Wacker L., Macdonald R.W., Yunker M.B., Eglinton T.I. (2015) Spatial variations in geochemical characteristics of the modern Mackenzie Delta sedimentary system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **171**, 100-120.