

СИСТЕМАТИКА РЕДКИХ ЗЕМЕЛЬ И Th ВО ВЗВЕСИ И ДОННЫХ ОСАДКАХ УСТЬЕВЫХ ЗОН РАЗНЫХ КАТЕГОРИЙ/КЛАССОВ РЕК МИРА И РЯДА КРУПНЫХ РЕК РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

© 2019 г. А. В. Маслов^{а,*}, В. П. Шевченко^{б,**}

^аИнститут геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН
Россия, 620016 Екатеринбург, ул. Вонсовского, 15

^бИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Россия, 117997 Москва, Нахимовский просп., 36
e-mail: *amas2004@mail.ru; **vshevch@ocean.ru

Поступила в редакцию 02.08.2016 г.
После доработки 24.04.2018 г.
Принята к публикации 19.06.2018 г.

Выполнено сопоставление особенностей распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) и Th во взвешенном материале ряда крупных рек Российской Арктики и донных осадках устьевых зон крупных категорий/классов рек мира. Сделан вывод, что тонкий (пелитовый и алеврито-пелитовый) материал рек Российской Арктики принадлежит в основном к классам 1 + 2 взвеси мировых рек (крупные реки и реки, дренирующие водосборы, сложенные преимущественно осадочными породами) и 4 (взвешенный материал рек, дренирующих вулканические области). Взвеси, сходные по распределению РЗЭ и Th с материалом, относящимся к донным осадкам устьевых зон рек категории/класса 3 (рек, дренирующих преимущественно метаморфические/магматические территории) для рек Российской Арктики, за исключением взвеси р. Лены по параметрам $(La/Yb)_N$ и Eu/Eu^* , нехарактерны.

Ключевые слова: взвешенный материал рек, донные осадки устьевых зон рек, Российская Арктика, распределение редкоземельных элементов и Th

DOI: 10.31857/S0016-7525201959-78

ВВЕДЕНИЕ

Данные о микроэлементном составе взвешенного материала крупных рек мира и донных осадков их устьевых зон играют важную роль при построении различных геологических и геохимических моделей (Taylor, McLennan, 1985), так как позволяют не только судить о составе размывавшихся на палеоводосборах комплексов пород, но и рассматриваются в качестве референтных материалов/стандартов, прежде всего при исследовании осадочных образований. Создание таких стандартов, к числу которых относятся Составная проба североамериканских фанерозойских сланцев/North American shale composite, NASC (Haskin, Haskin, 1966; Gromet et al., 1984), Европейский сланец/European shales, ES (Haskin et al., 1966), Постархейский средний австралийский сланец/Post-Archean Australian Shale, PAAS (Nance, Taylor, 1976; Taylor, McLennan, 1985; Pourmand et al., 2012), Средняя почва/Average Soil, AS (Shacklette, Boerngen, 1984; Rei-

mann et al., 2012; Negrel et al., 2015), Составная проба глинистых пород Русской платформы/Russian Platform Shale composite, RPSC (Мигдисов и др., 1994), Средний речной взвешенный сток/Average river suspended load, ARSL (Goldstein, Jacobsen, 1988), Средний Леесс/Average Loess, AL (Gallet et al., 1998; Jahn et al., 2001), Средний тонкозернистый аллювиальный осадок Северо-Восточной Австралии/Mud from Queensland, MUQ (Kamber et al., 2005), Средний взвешенный материал мировых рек/Average Suspended Sediment in World Rivers, SSWR (Viers et al., 2009) и другие, имеет уже достаточно длительную историю.

Последними (по времени представления читателям) из них являются Средняя глина мировых рек/World River Average Clay (WRAC) и Средний алеврит мировых рек/World River Average Silt (WRAS), рассматриваемые их авторами как «новые оценки среднего состава выветрелой и эродированной верхней континентальной

коры соответственно» (Bayon et al., 2015, с. 35). Более того, содержание РЗЭ во WRAS считается авторами данного стандарта приемлемой альтернативой PAAS, который, как известно, представляет собой средний состав всего 23 образцов австралийских глинистых сланцев, возраст которых варьирует от протерозоя до триаса (Nance, Taylor, 1976), тогда как при расчете WRAS использованы данные о распределении РЗЭ в донных осадках устьевых зон крупных речных артерий, площадь водосборных бассейнов которых составляет ~1/3 общей площади континентов.

При подготовке цитированной выше работы французские и бельгийские специалисты проанализировали методами WD-XRF и ICP-MS более 50 специальным образом подготовленных проб алевритовых и пелитовых фракций донных осадков из поверхностного слоя, собранных в устьевых частях рек, среди которых были как крупнейшие водные артерии (Амазонка, Конго, Миссисипи, Нил, Нигер, Янцзы, Маккензи, Волга, Ориноко, Меконг, Желтая, Амударья, Дон, Сев. Двина, Красная и др.), дренирующие водосборы, сложенные гетерогенными ассоциациями пород широкого возрастного диапазона, так и относительно небольшие реки, транспортирующие продукты разрушения более однородных в геологическом отношении питающих провинций. Специальная обработка включала удаление нетерригенных носителей РЗЭ (карбонатных минералов, оксигидроксидов Fe-Mn и органических компонентов) посредством процедуры пошагового выщелачивания (sequential leaching procedure).

В соответствии с характером исследованных рек все пробы отнесены авторами статьи (Bayon et al., 2015) к четырем категориям/классам: 1) донные осадки (отложения) «крупных рек» (World's major rivers), т.е. рек с площадью водосборного бассейна >100 000 км²; 2) донные осадки устьевых зон рек, дренирующих осадочные образования (rivers draining «mixed/sedimentary» formations) (Сена, Шеннон, Сефидруд, Блэкуотер и др.), площадь водосборного бассейна которых составляет <100 000 км²; 3) донные осадки устьев рек, питающихся продуктами размыва «магматических/метаморфических» террейнов (rivers draining «igneous/metamorphic» terranes) (водотоки Фенноскандии и Гайяны и ряда других крупных структур подобного типа, а также реки Армориканского массива); 4) донные осадки устьев рек, дренирующих как современные (п-ов Камчатка, Новая Зеландия, о. Реюньон), так и древние (третичные вулканы Северной

Ирландии) вулканические провинции (rivers draining «volcanic» rocks).

Исходя из анализа данных, приведенных в табл. 1 и на рис. 1, нам представляется, что суммированные в работе (Bayon et al., 2015) аналитические материалы для донных осадков устьевых зон рек мира как алевритового (2–63 мкм), так и, прежде всего, пелитового (<2 мкм) состава различных категорий/классов можно в первом приближении рассматривать как отражающие характерные черты взвеси, транспортируемой реками в морские бассейны из различных питающих провинций, и использовать эти данные для сравнения с аналогичными данными для взвеси крупных российских и канадских рек, впадающих в Северный Ледовитый океан (рис. 2). Одним из основных аргументов в пользу сказанного видится нам тот факт, что при сравнении распределения РЗЭ во взвеси и донных осадках устьевых частей рек мы в существенном числе случаев получаем сопоставимые данные. Очевидно, что распределение РЗЭ, показанное на рис. 1, описывается по крайней мере двумя сценариями. В первом (рр. Муррей, Конго и др.) параметры нормированных на хондрит спектров распределения РЗЭ во взвеси и в донных осадках приустьевых частей рек заметно отличаются (так, например, для р. Муррей величина $(La/Yb)_N$ во взвеси почти в 1.6 раза выше, чем в осадках приустьевой части, тогда как параметр $(Eu/Eu^*)_{\text{взвесь}}/(Eu/Eu^*)_{\text{донный осадок}}$ составляет 1.04). Во втором сценарии (рр. Амазонка, Миссисипи, Волга, Дон, Сев. Двина, Лена) значения различных параметров спектров РЗЭ для взвеси и донных осадков приустьевых зон рек в существенной мере схожи (например, для р. Дон величины $(La/Yb)_N$, $(Gd/Yb)_N$, Eu/Eu^* , $LP3Э/TP3Э^{\#}$, $LP3Э/TP3Э^{\#\#}$ и $(LP3Э/TP3Э)_N^{\#\#\#1}$ во взвеси составляют соответственно 0.85, 0.97, 0.97, 0.87, 0.88 и 0.90 от их значений в глинах донных осадков приустьевой части (табл. 1), т.е. отличаются на 15 и менее процентов, что, по нашему мнению, можно принимать как значения сопоставимые).

Необходимо подчеркнуть и еще одно обстоятельство. В настоящей работе мы сравниваем данные по распределению РЗЭ во взвеси ряда

¹ # здесь LP3Э – сумма содержаний La, Ce, Pr, Nd, Sm и Eu, TP3Э – сумма содержаний Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb и Lu; ## LP3Э – сумма содержаний La, Ce, Pr и Nd, TP3Э – сумма содержаний Er, Tm, Yb и Lu; ### LP3Э – сумма нормированных к хондриту (Taylor, McLennan, 1985) содержаний La, Ce, Pr, Nd, Sm и Eu, TP3Э – сумма нормированных к хондриту содержаний Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb и Lu.

Таблица 1. Содержание РЗЭ (г/т) во взвеси и донных осадках (пелиты и алевроито-пелиты) устьевых частей ряда рек и значения некоторых параметров, нормированных на хондрит их спектров распределения

Реки	Тип веще-ства	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	(La/Yb) _N	(Gd/Yb) _N	Eu/Eu*	ЛРЗЭ /ЛРЗЭ [#]	ЛРЗЭ /ЛРЗЭ ^{##}	ЛРЗЭ (ЛРЗЭ /ЛРЗЭ ^{###})
р. Маккензи	1	31.4	61.2	7.5	28.0	5.3	1.1	4.9	0.7	4.5	0.9	2.7	-	2.5	0.4	8.6	1.6	0.7	8.2	22.9	3.4
	2	52.2	99.0	11.1	39.8	6.9	1.4	5.4	0.8	4.9	1.0	3.0	-	3.1	0.5	11.3	1.4	0.7	11.2	30.6	4.6
	1/2															0.76	1.14	0.93	0.73	0.75	0.74
р. Миссисипи	3	19.2	40.3	-	18.0	3.4	0.7	3.0	-	2.5	-	1.4	-	1.3	0.2	10.9	2.1	0.7	9.9	26.8	4.6
	4	47.1	95.0	10.6	39.8	7.6	1.6	6.3	1.0	5.7	1.1	3.1	-	3.0	0.4	10.7	1.7	0.7	9.8	29.6	4.1
	3/4															1.02	1.21	0.96	1.01	0.91	1.12
р. Амазонка	5	43.5	98.0	-	40.4	8.1	1.5	5.5	1.2	4.1	-	2.1	0.5	2.5	0.4	11.9	1.8	0.7	11.7	-	3.6
	6	53.1	114.0	12.5	48.2	9.4	1.9	7.5	-	6.3	1.2	3.4	-	3.2	0.5	11.3	1.9	0.69	10.8	32.1	5.1
	5/6															1.06	0.95	1.02	1.09	-	0.71
р. Конго	7	50.5	89.5	-	38.5	7.1	1.6	2.5	0.9	-	-	-	-	2.5	0.4	13.7	0.8	1.2	-	-	7.8
	8	56.7	123.0	12.7	45.4	8.3	1.8	5.9	0.9	4.9	0.9	2.5	-	2.3	0.3	16.4	2.0	0.8	-	46.6	5.7
	9	41.7	94.8	-	39.0	6.7	1.6	-	0.7	-	-	-	-	2.6	-	10.8	-	-	-	-	13.8
	7/8															0.83	0.40	1.50	-	-	1.37
	9/8															0.66	-	-	-	-	2.42
р. Муррей	10	37.5	71.4	-	35.2	7.0	1.6	5.7	-	4.6	-	2.1	-	1.8	0.3	13.8	2.5	0.8	10.5	-	5.1
	11	29.7	54.0	6.6	25.1	5.0	1.1	4.1	0.7	3.8	0.8	2.3	-	2.3	0.4	8.7	1.4	0.7	8.5	23.1	3.5
	10/11															1.59	1.75	1.04	1.24	-	1.46
р. Волга	12	32.1	65.7	7.4	28.0	5.7	1.3	5.0	0.7	4.3	0.9	2.5	-	2.3	0.4	9.5	1.8	0.7	8.7	25.6	3.6
	13	27.3	55.3	6.6	25.7	5.0	1.1	4.1	0.6	3.3	0.7	2.0	0.3	1.9	0.3	9.8	1.8	0.7	9.2	25.5	3.5
	14	35.9	75.0	8.3	31.1	6.1	1.4	5.3	0.8	4.8	1.0	2.8	-	2.7	0.4	9.0	1.6	0.7	8.8	25.5	3.6
	12/14															1.06	1.10	1.02	0.98	1.00	1.00
	13/14															1.09	1.11	0.98	1.04	1.00	0.97
р. Дон	15	31.0	61.4	7.5	28.5	5.6	1.2	4.7	0.7	4.2	0.8	2.3	-	2.5	0.4	8.3	1.5	0.7	8.6	24.7	3.6
	16	34.3	75.0	7.9	29.2	5.6	1.2	4.5	0.7	4.2	0.8	2.4	-	2.4	0.4	9.8	1.6	0.7	9.9	28.2	4.0
	15/16															0.85	0.97	0.97	0.87	0.88	0.9

Табл. 1. (Окончание)

Реки	Тип веще- ства	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	(La/Yb) _N	(Gd/Yb) _N	Eu/Eu*	ЛРЗЭ /ЛРЗЭ [#]	ЛРЗЭ /ЛРЗЭ ^{##}	(ЛРЗЭ /ЛРЗЭ ^{###}) _N
р. Сев. Двина	17	27.9	59.6	6.6	25.0	4.8	1.1	4.0	0.6	3.6	0.7	1.9	-	2.3	0.3	8.4	1.5	0.8	9.3	26.5	3.8
	18	26.9	61.3	5.4	24.4	4.7	1.1	4.7	0.6	3.5	0.7	1.9	0.3	1.8	0.3	10.0	2.1	0.7	9.0	27.4	3.4
	19	20.6	42.3	4.9	19.0	3.7	0.8	3.7	0.5	2.7	0.5	1.4	0.2	1.3	0.2	10.9	2.3	1.0	8.8	28.0	3.5
	20	47.7	96.0	10.7	39.6	7.3	1.5	5.7	0.9	4.9	1.0	2.7	-	2.5	0.4	13.2	1.9	0.7	11.3	34.6	4.7
	17/20															0.64	0.77	1.05	0.82	0.77	0.81
	18/20															0.76	1.11	0.95	0.8	0.79	0.72
	19/20															0.83	1.23	0.95	0.78	0.81	0.74
	17/18															0.84	0.69	1.11	1.03	0.97	1.12
	17/19															0.77	0.63	1.11	1.06	0.95	1.09
	18/19															0.92	0.91	1.00	1.02	0.98	0.97
р. Лена, ее авандельта и море Лаптевых	21	44.0	95.0	10.2	37.0	6.6	1.6	6.4	0.8	4.6	0.9	2.6	0.3	2.4	0.4	12.4	2.2	0.8	10.6	32.7	4.1
	22	47.4	105.8	11.2	40.1	6.9	1.6	6.8	0.9	4.6	0.9	2.7	0.3	2.4	0.3	13.2	2.3	0.7	11.3	35.9	4.5
	23	39.7	86.0	9.2	33.6	6.1	1.4	5.7	0.8	4.3	0.8	2.4	0.3	2.4	0.3	11.1	1.9	0.7	10.3	31.2	4.0
	24	38.0	70.0	7.5	27.4	6.0	1.0	7.0	1.0	5.4	1.1	2.9	0.4	1.0		25.7	5.7	0.5	8.0	33.2	3.3
	25	41.9	74.5	7.7	27.5	6.4	1.3	6.9	1.0	5.7	1.2	3.2	0.5	2.3	0.4	12.3	2.4	0.6	7.5	23.7	2.9
	26	41.9	76.0	7.9	28.6	6.5	1.2	7.5	1.1	6.0	1.3	3.3	0.5	2.2	0.3	12.9	2.8	0.5	7.3	24.5	2.8
	21/22															0.94	0.96	1.05	0.94	0.91	0.91
	21/23															1.19	1.18	0.97	1.03	1.05	1.03
	21/24															0.48	0.38	1.60	1.33	0.98	1.24
	23/26															0.86	0.69	1.40	1.41	1.27	1.43
23/25															0.90	0.79	1.23	1.37	1.32	1.38	

Примечания. 1 – р. Маккензи, взвесь (Gaillardet et al., 1999; Савенко, 2006); 2 – р. Маккензи, устьевая зона, донный осадок (Вауон et al., 2015); 3 – р. Миссисипи, взвесь (Goldstein, Jakobson, 1988; Савенко, 2006); 4 – р. Миссисипи, устьевая зона, донный осадок (Вауон et al., 2015); 5 – р. Амазонка, взвесь (Martin, Meybeck, 1979; Гордеев, Монин, 1988; Goldstein, Jakobson, 1988; Савенко, 2006); 6 – р. Амазонка, устьевая зона, донный осадок (Вауон et al., 2015); 7 – р. Конго, взвесь (Martin et al., 1976; Dupre et al., 1996; Савенко, 2006); 8 – р. Конго, устьевая зона, донный осадок (Вауон et al., 2015); 9 – р. Конго, взвесь, обр. Когоб4 (Dupre et al., 1996); 10 – р. Муррей, взвесь (Goldstein, Jakobson, 1988; Савенко, 2006); 11 – р. Муррей, устьевая зона, донный осадок (Вауон et al., 2015); 12 – р. Волга, взвесь (Савенко и др., 2004; Савенко, 2006); 13 – р. Волга, взвесь, отобранная из поверхностного горизонта воды с помощью багетметра Нискина на ст. Якорь-2, рейс НИС «Никифор Шуреков» 2013 г. (Маслов и др., 2016); 14 – р. Волга, устьевая зона, донный осадок (Вауон et al., 2015); 15 – р. Дон, взвесь (Савенко и др., 2004; Савенко, 2006); 16 – р. Дон, устьевая зона, донный осадок (Вауон et al., 2015); 17 – р. Сев. Двина, взвесь (Савенко и др., 2004; Савенко, 2006); 18 – р. Сев. Двина, взвесь, май (Шевченко и др., 2010); 19 – р. Сев. Двина, взвесь, август (Шевченко и др., 2010); 20 – р. Сев. Двина, устьевая зона, донный осадок (Вауон et al., 2015); 21 – р. Лена, взвесь (Савенко, 2006); 22 – дельта р. Лена, взвесь, среднее для станций 18, 20, 21 и 22 (Rachold et al., 1996); 23 – нижнее течение р. Лена, взвесь, современное донное осадки и 14 (Rachold et al., 1996); 24 – авандельта р. Лена, современные донные осадки (Рубан, 2017); 25 – юго-восточная часть моря Лаптевых, губа Буор-Хая, современные донные осадки (Рубан, 2017); 26 – море Лаптевых, современные донные осадки (Рубан, 2017). Курсивом показаны величины отношений, полученные при делении значений тех или иных параметров нормированных на хондрит (Тейлор, МакЛеннан, 1988) спектров распределения РЗЭ во взвеси или разных ее типах на их значения, присущие донным осадкам приустьевых частей рек. Прочерк – нет аналитических данных, соответственно значения отношений не рассчитывались. # – здесь ЛРЗЭ – сумма содержащий La, Ce, Pr, Nd, Sm и Eu, ЛРЗЭ – сумма содержащий Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb и Lu; ## – здесь ЛРЗЭ – сумма содержащий La, Ce, Pr и Nd, а ЛРЗЭ – сумма содержащий Er, Tm, Yb и Lu; ### – здесь ЛРЗЭ – сумма нормированных к хондриту содержащий Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb и Lu, ЛРЗЭ/ЛРЗЭ – легкие/тяжелые редкоземельные элементы.

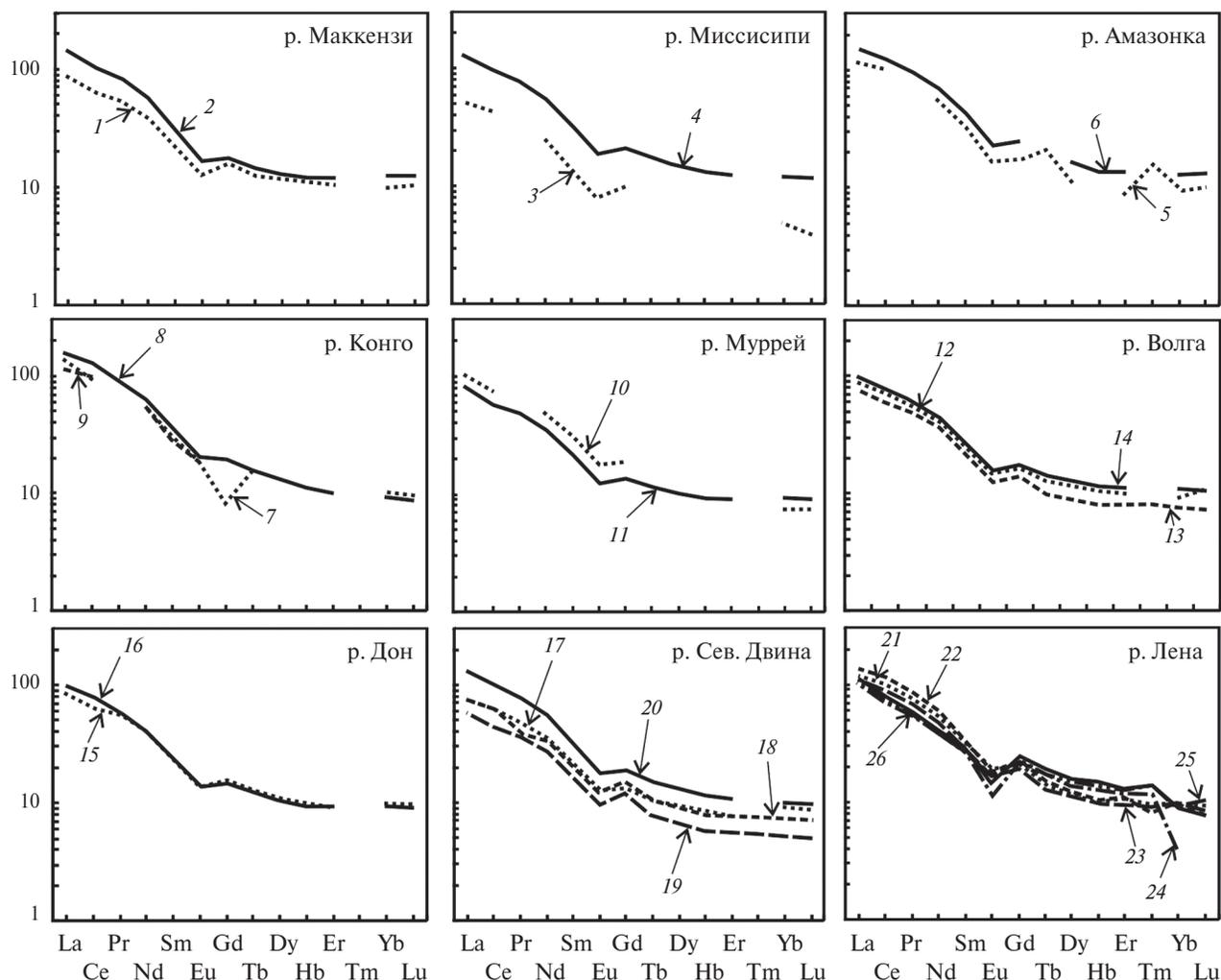


Рис. 1. Нормированное к хондриту распределение РЗЭ во взвеси и пелитовой фракции современных донных осадков устьевых частей ряда рек мира. Построено по данным, приведенным в табл. 1.

1 – р. Маккензи, взвесь; 2 – р. Маккензи, устьевая зона, донный осадок; 3 – р. Миссисипи, взвесь; 4 – р. Миссисипи, устьевая зона, донный осадок; 5 – р. Амазонка, взвесь; 6 – р. Амазонка, устьевая зона, донный осадок; 7 – р. Конго, взвесь; 8 – р. Конго, устьевая зона, донный осадок; 9 – р. Конго, взвесь, обр. Kongo64 (Dupré et al., 1996); 10 – р. Муррей, взвесь; 11 – р. Муррей, устьевая зона, донный осадок; 12 – р. Волга, взвесь; 13 – р. Волга, взвесь, отобранная из поверхностного горизонта воды с помощью батометра Нискина на ст. Якорь-2, рейс НИС «Никифор Шуреков» 2013 г. (Маслов и др., 2016); 14 – р. Волга, устьевая зона, донный осадок; 15 – р. Дон, взвесь; 16 – р. Дон, устьевая зона, донный осадок; 17 – р. Сев. Двина, взвесь; 18 – р. Сев. Двина, взвесь, май (Шевченко и др., 2010); 19 – р. Сев. Двина, взвесь, август (Шевченко и др., 2010); 20 – р. Сев. Двина, устьевая зона, донный осадок; 21 – р. Лена, взвесь; 22 – дельта р. Лена, взвесь, среднее для станций 18, 20, 21 и 22 (Rachold et al., 1996); 23 – нижнее течение р. Лена, взвесь, среднее для станций 11, 12, 13 и 14 (Rachold et al., 1996); 24 – авандельта р. Лены, современные донные осадки; 25 – юго-восточная часть моря Лаптевых, губа Буор-Хая, современные донные осадки; 26 – море Лаптевых, современные донные осадки. Данные для взвеси там, где это не указано особо, заимствованы из (Савенко, 2006 и ссылки там), данные для донных осадков приустьевых частей рек по (Bayon et al., 2015), данные для 24–26 по (Рубан, 2017).

рек Российской Арктики с аналогичными данными для глинистой компоненты (*разрядка наша* – А.М. и В.Ш.) донных осадков приустьевых частей различных категорий/классов рек. Так как речная взвесь в большинстве случаев не представлена только или преимущественно пелитовым материалом, и доля алевроита и тон-

кого песка в ней может быть достаточно большой, это ведет к определенному «разбавлению» свойственных ей содержаний РЗЭ. Следовательно, именно здесь существует вероятность «не полного наследования состава» взвеси донными осадками приустьевых частей рек. Однако на это приходится в определенной мере



Рис. 2. Крупные реки Российской Арктики, данные о распределении РЗЭ и Th во взвеси которых, рассматриваются в настоящей публикации, по (Географический..., 1997).

1 – Сев. Двина; 2 – Печора; 3 – Обь; 4 – Енисей; 5 – Хатанга; 6 – Лена; 7 – Омолой; 8 – Яна; 9 – Колыма.

«закрывать глаза». Поясним сказанное примером. Рассчитанное нами по данным (Bayou et al., 2015) значение $(La/Yb)_N$ для алевритов приустьевой части р. Амазонка составляет 8.1, а для пелитов/глин оно равно 11.3. Соответственно этот же показатель для смеси алеврит + пелит в соотношении 1:1 равен 9.6. Таким образом, если донный осадок не представлен исключительно пелитом или исключительно алевритом, то величина $(La/Yb)_N$ может варьировать в нем от 11.3 до 8.1, т.е. будет отличаться на почти или более 30%. Вот эти 30% и могут рассматриваться, на наш взгляд, как допустимые пределы вариации различных параметров нормированных на хондрит или любой другой референтный образец/стандарт спектров РЗЭ, при которых можно считать, что геохимические характеристики взвеси сопоставимы с характеристиками донных осадков приустьевых частей рек, несущих эту взвесь.

Содержание органического вещества в поверхностном слое донных осадков в маргинальных фильтрах сибирских рек сравнительно низкое (1–4% $C_{орг}$ в эстуариях рек Оби и Енисея, 0.2–2.5% $C_{орг}$ в маргинальном фильтре р. Лены) (Романкевич, Ветров, 2001). По-

этому основу донных осадков в маргинальных фильтрах составляют литогенные частицы, поступившие с речным стоком и осевшие в маргинальном фильтре (Лисицын, 1994). Таким образом, нам представляется, что распределение РЗЭ и Th во взвеси сибирских рек в основном и определяет их соотношение в поверхностном слое донных осадков маргинальных фильтров этих рек.

РЗЭ- И Th-СИСТЕМАТИКА ВЗВЕШЕННОГО МАТЕРИАЛА И ДОННЫХ ОСАДКОВ УСТЬЕВЫХ ЗОН РАЗЛИЧНЫХ КАТЕГОРИЙ/КЛАССОВ РЕК МИРА

Средние, минимальные и максимальные содержания РЗЭ во взвеси и в пелитовом материале донных осадков устьевых зон перечисленных выше категорий/классов рек мира и параметры нормированных на хондрит (Taylor, McLennan, 1985) их спектров, рассчитанные нами по аналитическим данным, представленными в работе (Bayou et al., 2015), суммированы в табл. 2. В ней же указаны вариации значений $\epsilon_{Nd}(0)$.

Анализ приведенных в табл. 2 данных показывает, что по величине $(La/Yb)_N$ с учетом

погрешностей донные осадки устьевых зон крупных рек и рек, дренирующих сложенные осадочными образованиями водосборы, практически не отличаются (соответственно 11.30 ± 2.69 и 10.60 ± 2.40). Несколько выше величина данного параметра в донных отложениях рек категории 3 (14.89 ± 3.24), тогда как в донных осадках устьевых зон рек, дренирующих водосборы, представленные вулканическими породами, средняя величина $(La/Yb)_N$ примерно в 2 и более раз ниже (4.65 ± 2.71). Сходство состава донных осадков устьевых зон рек категорий/классов 1 и 2 прослеживается и по средним значениям Eu/Eu^* , $(Eu/Sm)_N^2$, а также среднему содержанию Th (использование при построении одной из диаграмм этого элемента в какой-то степени компенсирует присутствие во многих публикациях среди аналитических данных только сведений о содержании La и Yb). Среднее содержание Th в архейских и протерозойских гранитах составляет, по данным (Condie, 1993), 15 и 18 г/т соответственно. В позднепротерозойских и мезо-кайнозойских базальтах концентрация Th существенно ниже – 2.6 и 2.4 г/т соответственно. Следовательно, содержание Th во взвешенном материале рек, как и основные параметры нормированных на хондрит спектров РЗЭ – $(La/Yb)_N$ и Eu/Eu^* , могут являться весьма информативным индикатором состава размывающихся на водоразделах комплексов пород. В то же время отложения рек классов 3 и 4 имеют несколько отличные величины перечисленных параметров. Наблюдается определенное различие между составом донных осадков устьевых зон (а следовательно, и взвешенного вещества) рек, дренирующих различные по составу водосборы, и по параметру $\epsilon_{Nd}(0)$.

Сходство и различие РЗЭ-систематики донных осадков устьевых зон и взвеси рек различных категорий/классов достаточно хорошо выражено на серии парных диаграмм (рис. 3). На них поля крупных рек и рек, дренирующих осадочные образования, характеризуются примерно 60–80-процентным перекрытием, а поля рек, получающих взвешенный материал за счет размыва водосборов, сложенных, с одной сто-

роны, магматическими и метаморфическими образованиями, а с другой – вулканическими породами, не имеют перекрытия вовсе. Исходя из сказанного, указанные диаграммы могут быть использованы в том числе и для установления источников материала для современных донных осадков морей Российской Арктики, а также осадочного материала, транспортируемого дрейфующими льдами (IRS – ice-rafted sediments). Последняя задача является в настоящее время весьма актуальной (Левитан и др., 2007; Лисицын, 2010; Шевченко и др., 2016, 2017a, 2017б; Darby et al., 2011; Lisitzin, Shevchenko, 2016).

РЗЭ- И Th-СИСТЕМАТИКА ВЗВЕСИ И СОВРЕМЕННЫХ ДОННЫХ ОСАДКОВ КРУПНЫХ РЕК РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Приводимые ниже сведения о распределении во взвеси ряда крупных рек, впадающих в моря Российской Арктики, и их современных донных осадках РЗЭ и Th являются в значительной степени разнородными. Ранее на это обстоятельство обратил внимание и В.С. Савенко (2006). Часть из них получена методом ICP-MS и дает представление о концентрациях в пробах всей совокупности лантаноидов, Th и других редких и рассеянных элементов. Однако во многих случаях в опубликованной в 1990-х–начале 2000-х гг. (а иногда и в последние годы) литературе имеются материалы только по содержаниям отдельных редкоземельных элементов или их сумме в целом (см., например, Holemann et al., 1999), полученные методом инструментального нейтронно-активационного анализа. Как-то решить эту проблему без проведения полномасштабной ревизии материалов значительного числа морских экспедиций, в которых принимали участие как российские, так и иностранные специалисты, в настоящее время, увы, невозможно.

Белое море и р. Сев. Двина. В данной работе использованы сведения о распределении РЗЭ и Th в 49 пробах современных донных осадков дельты р. Сев. Двины и Двинского залива и средние данные для взвеси Сев. Двины в период половодья и летней межени, полученные авторами методом ICP-MS в начале 2010-х гг. в рамках проекта «Система Белого моря» (Шевченко и др., 2010; Маслов и др., 2012, 2013, 2014). Реки Сев. Двина и Онега являются основными поставщиками взвешенного материала в Белое море (Система..., 2010). Водосбор, дренируемый

² Так как во многих литературных источниках сведения о распределении РЗЭ в современных донных осадках морей Российской Арктики и впадающих в них крупных рек в силу разных причин не полные, мы вынуждены далее при анализе величины Eu аномалии оперировать не привычным для многих значением $Eu/Eu^* = Eu_N/\sqrt{Sm_N} \times Gd_N$, где «N» – показатель нормирования по хондриту (Taylor, McLennan, 1985), а его заменителем – $(Eu/Sm)_N$ (Дубинин, 2006).

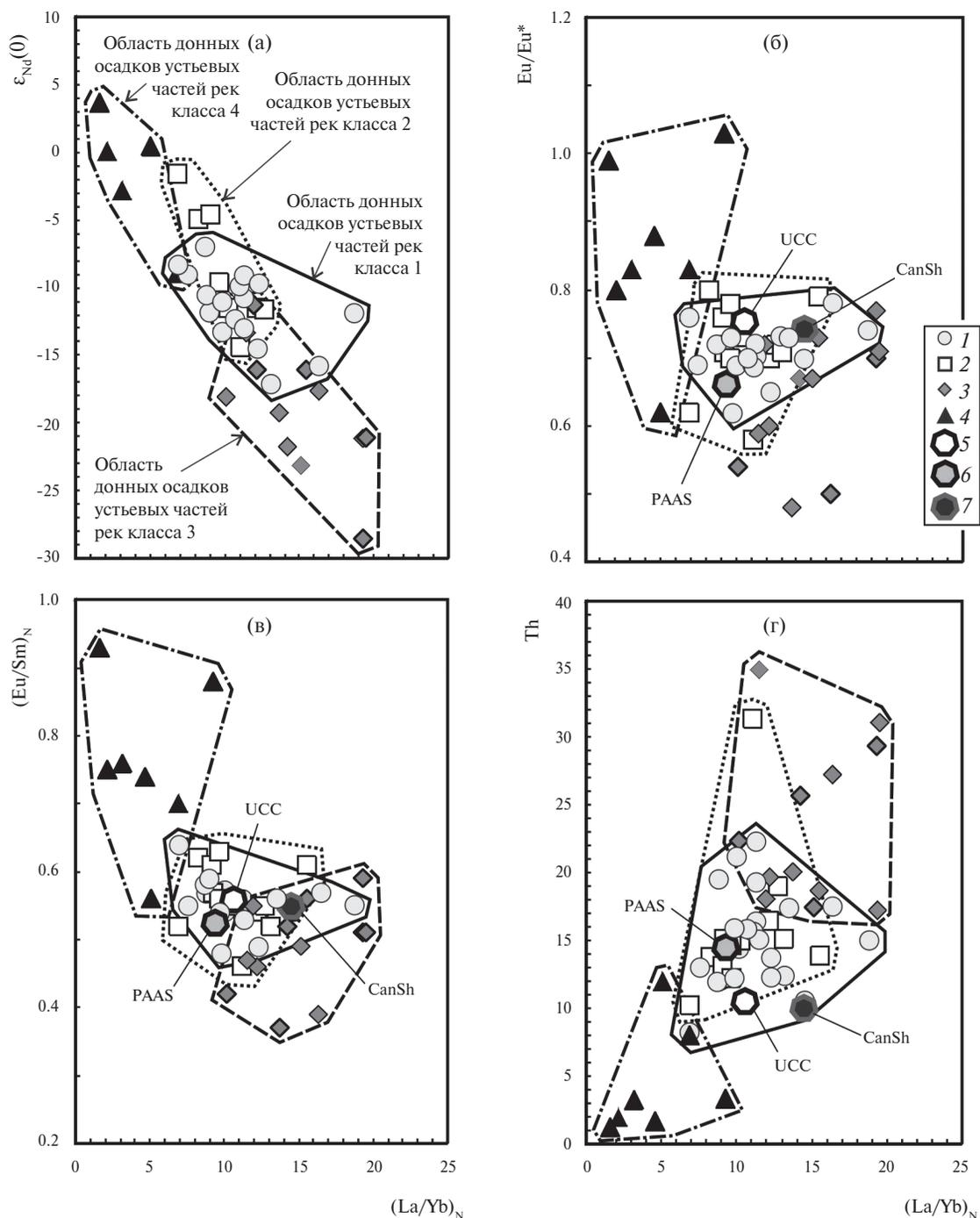


Рис. 3. Области распределения точек состава донных осадков устьевых частей рек мира различных категорий/классов на диаграммах $(La/Yb)_N - \epsilon_{Nd}(0)$ (а), $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$ (б), $(La/Yb)_N - (Eu/Sm)_N$ (в) и $(La/Yb)_N - Th$ (г). Построено по аналитическим данным, приведенным в работе (Bayon et al., 2015).

1 – область донных осадков устьевых частей рек категории 1; 2 – то же рек категории 2; 3 – то же рек категории 3; 4 – то же рек категории 4; 5 – средняя верхняя континентальная кора (UCC), по (Rudnick, Gao, 2003); 6 – PAAS; 7 – Канадский щит (CanSh).

р. Сев. Двиной и ее притоками, сложен туфо-генно-терригенными образованиями верхнего венда, а также осадочными породами карбона, перми и мезозоя (Губайдуллин, 2010).

Средняя величина $(La/Yb)_N$ для всей выборки имеющихся в нашем распоряжении данных равна 7.11 ± 1.32 . Параметр Eu/Eu^* среднее составляет 0.83 ± 0.13 , а величина $(Eu/Sm)_N$ варьирует от 0.51 до 0.96 при среднем значении 0.71 ± 0.12 .

Концентрации Th в исследованных пробах изменяются от 0.71 до 9.85 г/т ($Th_{\text{среднее}} = 3.96 \pm 2.72$ г/т). Рассчитанная нами по данным (Савенко и др., 2004) величина $(La/Yb)_N$ во взвеси Сев. Двины составляет 8.38, параметр $(Eu/Sm)_N$ равен 0.61, а средняя концентрация Th почти в два раза выше (7.90 г/т). Величина $\epsilon_{Nd}(0)$ в осадках дельты Сев. Двины, Двинского залива и Бассейна варьирует от -12.9 до -18 (Маслов и др., 2014). Несколько иные значения указанных параметров получены для взвеси, отобранной в весенний (май, 2004, 2005 и 2006 гг.) и летний (август 1997 и 2006 гг.) периоды (Шевченко и др., 2010). Так, средние значения $(La/Yb)_N$, Eu/Eu^* и $(Eu/Sm)_N$ для майской взвеси составили 9.73, 0.69 и 0.60 при концентрации Th 7.33 г/т. Августовская взвесь характеризуется средними значениями перечисленных параметров соответственно 10.88, 0.69, 0.60 и 4.95 г/т.

Река Печора. Водосборный бассейн Печоры расположен между Северным и Приполярным Уралом и Тиманом. В его пределах распространены кристаллические сланцы, разнообразные терригенные и карбонатные образования широкого возрастного диапазона, четвертичные аллювиальные и моренные отложения. Сведения о распределении РЗЭ и Th во взвеси р. Печоры ограничены (Морозов и др., 1974; Лисицын и др., 1980). Рассчитанная по ним величина $(Eu/Sm)_N$ составляет 0.51, а содержание Th равно 6.5 г/т, что, как мы увидим далее, несколько меньше, чем это характерно для взвеси р. Оби и почти в два раза меньше концентрации Th во взвешенном материале р. Лены.

Эстуарий р. Оби. Для донных осадков эстуария р. Оби (маргинальный фильтр) использованы сведения о распределении РЗЭ и Th, полученные методом ИНАА Эн.Э. Асадулиным с соавторами (2013, 2015) (всего 205 проб с 17 станций). Водосбор Оби сложен преимущественно четвертичными осадочными образованиями Западно-Сибирской низменности (доминируют) и метаморфическими комплексами пород Алтае-Саянской складчатой области. Значения $(La/Yb)_N$ в донных осадках Обского эстуария варьируют от 7.39 до 8.25. Средняя величина этого параметра с учетом погрешностей (7.84 ± 0.28) сопоставима с величиной $(La/Yb)_{\text{среднее}}$ в осадках Белого моря (7.11 ± 1.32). Параметр $(Eu/Sm)_{\text{среднее}}$ равен 0.66 ± 0.03 (минимум – 0.63, максимум – 0.72). Среднее содержание Th составляет 8.25 ± 0.88 г/т. По данным (Савенко и др., 2004), средняя величина $(La/Yb)_N$ для взвешенного материала р. Оби несколько выше

(8.06), тогда как значение $(Eu/Sm)_N$ и содержание Th – ниже (соответственно 0.61 и 7.80 г/т).

Эстуарий р. Енисей. Енисей питается взвешенным материалом, поступающим за счет размыва, с одной стороны, четвертичных отложений Западной Сибири (в этом он в существенной степени сопоставим с Обью), а с другой – базальтов/траппов плато Путорана (Шевченко и др., 1996; Rachold, 1999; Лукашин и др., 2000; Gordeev et al., 2007). Характеристику РЗЭ- и Th-систематики донных отложений его эстуария мы приводим по данным Эн.Э. Асадулина с соавторами (2013, 2015), основанным на анализе более 300 проб, собранных на 19 станциях. Средняя величина $(La/Yb)_N$ донных осадков эстуария р. Енисей составляет 6.67 ± 0.33 , что несколько ниже, чем в аналогичных образованиях Обской губы. Значения $(Eu/Sm)_N$ варьируют от 0.66 до 0.84, а содержание Th находится в пределах 4.62–9.42 г/т (среднее – 6.74 ± 1.27 г/т). Примерно такие же величины рассматриваемых параметров мы получаем и по данным о распределении РЗЭ и Th во взвешенном материале Енисея, приведенным в работе (Савенко и др., 2004) (табл. 2).

Реки Хатанга, Хета и Котуй. Взвесь указанных рек содержит существенную долю продуктов размыва базальтов плато Путорана (Rachold, 1999). Для взвешенного материала р. Хатанги, по данным (Rachold, 1999), характерно среднее содержание Th ~5.30 г/т; величины $(La/Yb)_N$ и $(Eu/Sm)_N$ составляют соответственно 6.76 и 0.80. Взвесь Хеты и Котуя обладает несколько меньшими значениями $(La/Yb)_N$ (5.53 и 5.58) и средними содержаниями Th (4.20 и 4.60 г/т), что указывает на повышенную, по сравнению со взвесью Хатанги, долю в ее составе продуктов разрушения основных магматических пород. Значения $(Eu/Sm)_N$ для взвешенного материала всех трех рек, рассчитанные нами по данным (Rachold, 1999), весьма близки (Хатанга – 0.77, Хета – 0.82, Котуй – 0.83).

Взвешенный материал Оби, Енисея и Хатанги осаждается в восточной части Карского моря и на западе моря Лаптевых (Гурвич и др., 1994; Левитан и др., 2005; Levitan et al., 2002). По представлениям (Martinez et al., 2009), характерные геохимические черты этого материала отражают существенный вклад продуктов размыва траппов. Восточная часть моря Лаптевых и Восточно-Сибирское море получают обломочный материал в основном за счет рр. Лены, Яны, Омолуй, Колымы и ряда других, во взвеси которых преобладают продукты эрозии

Таблица 2. Средние, минимальные и максимальные содержания ряда редкоземельных элементов и Th (г/т), а также значения некоторых параметров нормированных на хондрит спектров РЗЭ во взвеси и донных осадках устьевых зон рек мира различных категорий и крупных рек Российской Арктики

Реки	La	Sm	Eu	Gd	Yb	Th	(La/Yb) _N	Eu/Eu*	(Eu/Sm) _N	$\epsilon_{Nd}(0)$
ВЗВЕСЬ										
р. Лена (Rachold et al., 1996)	43.22±6.74 29.10–54.00	6.54±0.89 4.46–7.80	1.49±0.16 1.15–1.78	6.16±0.89 4.18–7.71	2.46±0.31 1.66–2.86	11.85±1.98 7.10–14.40	11.89±1.34 9.92–14.78	0.72±0.05 0.66–0.84	0.61±0.05 0.55–0.72	-
р. Сев. Двина (Савенко и др., 2004; Савенко, 2006)	27.90	4.80	1.10	4.04	2.25	7.90	8.38	0.78	0.61	-
р. Сев. Двина, весеннее половодье (Шевченко и др., 2010)	26.2±1.9 22.5–29.7	4.71±0.30 4.09–5.17	1.06±0.07 0.94–1.20	4.73±0.29 4.10–5.25	1.82±0.11 1.60–2.04	7.33±0.60 6.36–8.69	9.73	0.69	0.60	-
р. Сев. Двина, летняя межень (Шевченко и др., 2010)	20.6±1.05 19.4–21.6	3.69±0.35 3.42–4.20	0.83±0.07 0.07–0.92	3.67±0.23 3.43–3.95	1.28±0.14 1.16–1.48	4.95±0.45 4.62–5.58	10.88	0.69	0.60	-
р. Печора (Морозов и др., 1974; Лисицын и др., 1980)	31.90	6.30	1.20	-	-	6.50	-	-	0.51	-
р. Обь (Савенко и др., 2004)	29.10	5.30	1.22	4.83	2.44	7.80	8.06	0.78	0.61	-
р. Енисей (Савенко и др., 2004)	22.70	4.33	1.14	4.13	2.33	6.10	6.58	0.84	0.70	-
р. Лена (Gordeev, Shevchenko, 1995; Rachold et al., 1996; Rachold, 1999)	44.00	6.60	1.60	6.40	2.40	11.70	12.39	0.80	0.64	-
р. Яна (Rachold, 1999)	31.00	5.80	2.10	5.90	2.40	8.50	8.73	0.98	0.96	-
р. Омолой (Rachold, 1999)	27.00	5.30	1.60	5.50	2.30	5.30	6.76	0.90	0.77	-
р. Хатанга (Rachold, 1999)	22.00	4.50	1.30	4.70	2.20	8.50	7.93	0.88	0.80	-
р. Хета (Rachold, 1999)	18.00	3.90	1.20	4.30	2.20	4.20	5.48	0.90	0.82	-
р. Котуй (Rachold, 1999)	19.00	4.20	1.30	4.80	2.30	4.60	5.68	0.91	0.83	-
р. Маккензи (Gaillardet et al., 1999)	31.40	5.30	1.12	4.86	2.46	10.30	9.37	0.75	0.56	-
р. Арктик-Ред-Ривер (Gaillardet et al., 1999)	34.10	5.63	1.14	5.06	2.70	10.40	8.53	0.73	0.54	-

Табл. 2. (Окончание)

ДОННЫЕ ОСАДКИ												
Реки мира категории 1 (Вауон et al., 2015)	45.91±11.46	6.94±1.59	1.44±0.31	5.37±1.35	2.78±0.64	15.11±3.49	11.30±2.69	0.71±0.04	0.55±0.03	-17.1...-6.9		
	21.10-64.70	4.22-9.61	0.92-1.90	3.08-7.82	2.07-4.36	8.30-22.30	6.89-18.73	0.62-0.78	0.48-0.64			
Реки мира категории 2 (Вауон et al., 2015)	44.33±6.41	7.01±1.16	1.48±0.29	5.71±1.13	2.89±0.38	15.88±5.34	10.60±2.40	0.72±0.06	0.56±0.05	-16.2...-1.6		
	33.30-55.00	4.37-8.62	0.85-2.04	3.05-7.44	2.23-3.36	10.30-31.40	6.86-15.50	0.58-0.80	0.46-0.63			
Реки мира категории 3 (Вауон et al., 2015)	65.43±15.24	9.24±2.33	1.68±0.44	7.16±2.17	3.03±0.72	23.53±6.01	14.89±3.24	0.64±0.09	0.49±0.07	-29...-11		
	42.40-89.20	6.58-14.78	1.18-2.64	4.76-12.62	2.00-4.81	17.30-35.00	10.11-19.51	0.48-0.77	0.37-0.59			
Реки мира категории 4 (Вауон et al., 2015)	15.69±9.32	4.33±1.48	1.22±0.39	4.61±1.69	2.54±1.05	4.53±4.00	4.65±2.71	0.85±0.14	0.76±0.12	-8.9...+3.7		
	6.40-29.90	1.75-6.15	0.49-1.74	1.65-6.47	0.94-3.61	1.27-12.00	1.58-9.24	0.62-1.03	0.56-0.93			
Дельта р. Сев. Двины и Двинский залив (Маслов и др., 2014 и неопубликованные данные этих же авторов)	14.95±8.74	2.61±1.47	0.65±0.30	2.48±1.39	1.36±0.64	3.96±2.72	7.11±1.32	0.83±0.13	0.71±0.12	-18...-12.9		
	4.02-33.12	0.70-5.87	0.24-1.31	0.68-5.28	0.42-2.54	0.71-9.85	4.06-10.41	0.66-1.06	0.51-0.96			
Эстуарий р. Оби (Асадулин и др., 2013)	31.68±3.01	5.64±0.54	1.40±0.12	-	2.73±0.26	8.25±0.88	7.84±0.28	-	0.66±0.03	-		
	27.60-37.20	4.63-6.38	1.18-1.55	-	2.26-3.10	6.88-9.82	7.39-8.25	-	0.63-0.72			
Эстуарий р. Енисей (Асадулин и др., 2013)	27.16±3.48	5.17±0.60	1.38±0.15	-	2.75±0.34	6.74±1.27	6.67±0.33	-	0.71±0.05	-		
	20.80-33.80	4.02-5.94	1.06-1.67	-	2.27-3.45	4.62-9.42	6.19-7.17	-	0.66-0.84			
Восток Восточно-Сибирского моря (Шакиров и др., 2010)	22.79±1.49	4.64±0.31	0.96±0.11	4.16±0.35	1.71±0.16	8.01±0.69	9.07±0.66	0.67±0.04	0.55±0.04	-		
	19.60-26.11	3.68-5.40	0.71-1.21	3.17-4.93	1.22-2.03	5.57-8.96	7.85-10.86	0.62-0.73	0.50-0.62			
Чукотское море (Сhen et al., 2003)	20.61±1.08	3.57±0.18	0.99±0.05	3.40±0.21	1.90±0.25	-	7.41±1.10	0.86±0.02	0.73±0.01	-		
	19.76-22.10	3.40-3.81	0.94-1.05	3.18-3.68	1.66-2.24	-	5.99-9.00	0.85-0.88	0.72-0.74			
Чукотское море (Астахов и др., 2013)	29.35±6.21	-	-	-	2.59±1.37	-	8.31±1.14	-	-	-		
	19.00-45.00	-	-	-	0.90-13.00	-	6.48-14.27	-	-			

метаморфических и осадочных образований (Rachold et al., 1996; Rachold, 1999). Соответственно геохимические особенности распространенных на шельфах указанных морей современных донных осадков должны быть в существенной степени близки к геохимическим характеристикам среднего глинистого сланца (Martinez et al., 2009). Поступающая на шельф моря Лаптевых ленская речная взвесь является важным источником IRS, транспортируемого Трансполярным дрейфом до пролива Фрама (Pfirman et al., 1990; Bischof et al., 1990; Reimnitz et al., 1994; Rachold, 1999; Лисицын, 2010; Dethleff, Kuhlmann, 2010; Lisitzin, Shevchenko, 2016), и знание ее геохимических особенностей может играть важную роль в реконструкции путей перемещения осадочного материала дрейфующими льдами (Шевченко и др., 2017б).

Река Лена и ее притоки. Распределение РЗЭ и Th во взвешенном материале р. Лены, ее дельты и крупных притоков рассмотрено по данным, приведенным в работе (Rachold et al., 1996). Они основаны на исследовании как собственно ленской взвеси, так и взвешенного материала Алдана и Вилюя методами ICP-OES и ICP-MS.

Основная часть водосборного бассейна Лены приходится на Сибирскую платформу, разные структурные элементы которой представлены терригенно-карбонатными образованиями (Приленское плато), терригенными отложениями (Центрально-Якутская равнина), вулканитами триаса (Оленекско-Вилюйское плоскогорье), а также архейскими и протерозойскими кристаллическими образованиями (Алданский район). На юге в состав ленского водосбора входит Байкальская складчатая область (гнейсы, кристаллические сланцы и мраморы протерозойского возраста), на юго-востоке — Охотско-Чукотский вулканогенный пояс (андезиты, кремнекислые вулканиты, в том числе туфы и игнимбриты, базальты), а на северо-востоке — Верхоянско-Колымский складчатый пояс (каменноугольно-пермские терригенные образования, вулканиты и гранитоиды триаса и юры) (Филатова, 1988; Rachold et al., 1996; Rachold, 1999).

Такой разнородный состав водосбора и его громадная площадь (~2 500 000 км²) должны в итоге обусловить сходство состава взвешенного материала Лены со средним составом верхней континентальной коры и многих других речных артерий подобного класса (Martin, Meubeck, 1979; Taylor, McLennan, 1985; Gaillardet et al., 1995; Bayon et al., 2015). Среднее значение $(La/Yb)_N$ во взвеси р. Лены, ее дельте и прито-

ках, рассчитанное нами по аналитическим данным (Rachold et al., 1996), составляет 11.89 ± 1.34 (для средней верхней континентальной коры, УСС, этот параметр, по (Rudnick, Gao, 2003), равен 10.47). Параметр $Eu/Eu^*_{\text{среднее}}$ составляет 0.72 ± 0.05 . Величина $(Eu/Sm)_N$ в ленской взвеси варьирует от 0.55 до 0.72 (среднее — 0.61 ± 0.05); в УСС это отношение составляет 0.56. Содержание Th во взвешенном материале р. Лены колеблется от 7.10 до 14.40 г/т (среднее — 11.85 ± 1.98 г/т), а в УСС оно равно 10.50 г/т (Rudnick, Gao, 2003). В.С. Савенко (2006) для взвеси Лены приводит следующие средние значения перечисленных выше параметров, рассчитанные по работам (Gordeev, Shevchenko, 1995; Rachold et al., 1996; Rachold, 1999) — 12.39, 0.64 и 11.70 г/т. Довольно любопытно отмеченное в работах (Rachold et al., 1996; Rachold, 1999) отличие взвеси Лены и Алдана, с одной стороны, от взвеси р. Вилюй, по такому параметру, как Eu/Eu^*_{NASC} . Для взвешенного материала Вилюя характерно среднее значение $Eu/Eu^*_{\text{NASC}} \sim 1.25$, что указывает на размыв преимущественно пород трапповой ассоциации (Rachold et al., 1996).

Сопоставляя эти данные с данными для донных осадков эстуария р. Оби нетрудно увидеть, что в ленской взвеси значение $(La/Yb)_N$ и содержание Th заметно выше, а величина $(Eu/Sm)_N$ несколько ниже. Это дает основание предполагать, что водосбор Оби сложен в целом менее зрелыми в геохимическом отношении образованиями.

Реки *Омолой* и *Яна*, несущие свои воды в восточную часть моря Лаптевых, питаются взвешенным материалом, поступающим за счет эрозии восточных отрогов Верхоянского хребта и западного склона хр. Черского. Средние значения $(La/Yb)_N$ и содержания Th в их взвешенном материале, рассчитанные нами по данным (Rachold, 1999), заметно ниже, чем в ленской взвеси (соответственно 8.73 и 6.76, 8.50 и 5.30 г/т), а средние величины $(Eu/Sm)_N$, напротив, примерно в 1.6 и 1.3 раза выше. Все вместе это дает основание предполагать, так же как и для обского водосбора, присутствие в составе водосборов названных выше рек существенной доли примитивных в геохимическом отношении субстратов. Примечательно также, что средний микроэлементный состав взвешенного материала р. Яны в заметной степени отличается от состава ленской взвеси (Rachold, 1999).

В публикации (Шакиров и др., 2010) приведена информация о распределении РЗЭ и Th в алеврито-пелитовых и пелито-алевритовых осадках *востока Восточно-Сибирского моря*, формирую-

щихся, по всей видимости, в существенной степени за счет взвешенного материала р. Колымы, вдоль профиля длиной более 500 км, протянувшегося от мыса Биллингса к хр. Менделеева. По данным авторов, содержание Th (как, впрочем, и большинства других химических элементов) в поверхностном слое осадков ниже средней его концентрации «в осадочных породах континентов» (Шакиров и др., 2010, с. 107) и составляет 8.01 г/т (минимум – 5.57, максимум – 8.96 г/т). Выполненный нами по приведенным в указанной работе аналитическим данным расчет средних величин Eu/Eu^* , $(La/Yb)_N$ и $(Eu/Sm)_N$ дал следующие значения – 0.67 ± 0.04 , 9.07 ± 0.66 и 0.55 ± 0.04 . По данным (Астахов и др., 2013; Колесник, 2015), современные донные осадки востока Восточно-Сибирского моря характеризуются величиной $(La/Yb)_{N_{\text{среднее}}}$ 7.54 ± 2.30 (минимум – 2.94, максимум – 11.36).

Современные донные отложения Чукотского моря почти на 90% сложены материалом, образующимся за счет размыва дна и абразии берегов; вклад же собственно речного стока составляет ~5% (Яшин, 2000; Астахов и др., 2013). По представлениям (Viscosi-Shirley, 2001; Viscosi-Shirley et al., 2003), в составе донных осадков существенную роль играют продукты разрушения основных вулканических пород. Средняя величина $(La/Yb)_N$ для них, рассчитанная по ограниченной выборке аналитических данных, приведенной в работе (Chen et al., 2003), равна 7.41 ± 1.10 (минимум – 5.99, максимум – 9.00), параметр Eu/Eu^* $_{\text{среднее}}$ имеет значение 0.86 ± 0.02 , а величина $(Eu/Sm)_{N_{\text{среднее}}}$ – 0.73 ± 0.01 . По аналитическим данным из публикации (Астахов и др., 2013), среднее значение $(La/Yb)_N$ несколько выше и составляет 8.31 ± 1.14 (минимум – 6.48, максимум – 14.27).

РЗЭ- И Th-СИСТЕМАТИКА ВЗВЕСИ И СОВРЕМЕННЫХ ДОННЫХ ОСАДКОВ РЕК МАККЕНЗИ И АРКТИК-РЕД-РИВЕР

Присущий рр. Маккензи и Арктик-Ред-Ривер состав водосборов для рек Российской Арктики в целом не характерен. Площадь водосборного бассейна р. Маккензи составляет $\sim 1.8 \times 10^6$ км² (у Оби $\sim 3.0 \times 10^6$, Енисея $\sim 2.6 \times 10^6$, Сев. Двины $\sim 0.36 \times 10^6$ км²). Он объединяет три геологические провинции: Кордильеры, Внутреннюю платформу и Канадский щит (Millot et al., 2003). Первая представлена в основном домезозойскими осадочными и метаморфическими породами; роль изверженных образова-

ний среди них невелика (р. Арктик-Ред-Ривер получает взвешенный материал как раз из этой провинции). Внутренняя платформа сложена преимущественно глинистыми сланцами, песчаниками, известняками и эвапоритами. В пределах Канадского щита на дневную поверхность выходят в основном архейские кристаллические породы. В целом, по данным (Reeder et al., 1972), ~70% площади водосборного бассейна р. Маккензи сложено осадочными породами, на долю кристаллических комплексов приходится ~22%. Остальное – это кислые интрузивные породы, вулканы и ультрабазиты. Исходя из сказанного, можно предполагать, что микроэлементный состав взвешенного вещества р. Маккензи и современных донных осадков моря Бофорта должен отражать, с одной стороны, средний состав осадочных образований (т.е. быть сопоставимым с PAAS или NASC), а с другой – средний состав Канадского щита.

Рассчитанные по аналитическим данным, приведенным в публикации (Gaillardet et al., 1999), величины $(La/Yb)_N$ и $(Eu/Sm)_N$ для взвеси рр. Маккензи и Арктик-Ред-Ривер составляют соответственно 9.37 и 8.53, 0.56 и 0.54, т.е. достаточно близки к значениям перечисленных параметров в УСС (10.47 и 0.56). Сходство подчеркивается и практически идентичными содержаниями Th во всех трех объектах (10.30, 10.40 и 10.50 г/т).

ОБСУЖДЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обратимся теперь к сопоставлению приведенных выше данных для рек Российской Арктики и севера Канады с данными по распределению РЗЭ и Th во взвешенном материале различных категорий/классов рек мира и в донных осадках их устьевых зон. Как следует из рис. 3, по значениям $(La/Yb)_N$, Eu/Eu^* , $(Eu/Sm)_N$ и содержанию Th можно более или менее удовлетворительно выделить категории/классы рек, дренирующих осадочные, магматические+метаморфические и вулканические образования.

На диаграмме $(La/Yb)_N$ – Eu/Eu^* средние точки взвеси рр. Енисей, Омолуй, Яны, Хатанги, Хеты и Котуй расположены в поле состава донных осадков устьевых зон рек категории 4 (рис. 4), т.е. существенную роль в выносимом ими в Северный Ледовитый океан материале, в соответствии с представлениями (Bayon et al., 2015), играют продукты эрозии вулканических пород. Фигуративные точки (индивидуальные

пробы) взвешенного материала Сев. Двины распределены на указанной диаграмме как в поле 4, так и в области перекрытия полей 1 (взвесь крупных рек) и 2 (взвесь рек, дренирующих водосборы, сложенные преимущественно осадочными породами). Это требует как будто бы особого обсуждения, так как водосбор р. Сев. Двины сложен почти исключительно осадочными образованиями, однако и средняя точка состава взвеси Северной Двины (данные из работ Савенко и др., 2004; Савенко, 2006), как и средняя точка взвеси р. Оби, расположена примерно на границе полей 1 и 2, с одной стороны, и поля 4, — с другой. Более того, ранее нами (Маслов и др., 2014) уже было отмечено, что общие параметры РЗЭ-систематики современных донных осадков Белого моря и дельты Сев. Двины дают основания предполагать присутствие в составе слагающей их тонкой алюмосиликокластики определенной доли продуктов размыва основных магматических пород. Этот вывод перекликается с представлениями, изложенными в (Гордеев, Лисицын, 2017).

В то же время данные по другим индикаторным элементам-примесям позволяют сделать несколько иные выводы. Так, соотношение Hf и La/Th указывает на ведущую роль в формировании указанных образований продуктов размыва достаточно зрелой континентальной коры. Это же следует и из присущих им значений La/Sc и Th/Co. В то же время на диаграммах Sc/Th–Cr/Th, $(La/Yb)_N$ –Cr/Th и $(La/Yb)_N$ –Ti/Nb (в настоящей статье не приведены) фигуративные точки составов современных донных осадков Белого моря и дельты р. Сев. Двины занимают промежуточное положение между точками средних составов кислых и основных пород верхнего архея и нижнего протерозоя. В целом характер распределения точек составов современных донных осадков Белого моря (Двинский залив) и дельты р. Сев. Двины на диаграммах $(Gd/Yb)_N$ –Eu/Eu* и Eu/Eu*–Cr/Th и значения ряда индикаторных отношений редких и рассеянных элементов дает основание считать, что их систематика определяется смешением кластики из двух геохимически контрастных областей питания:

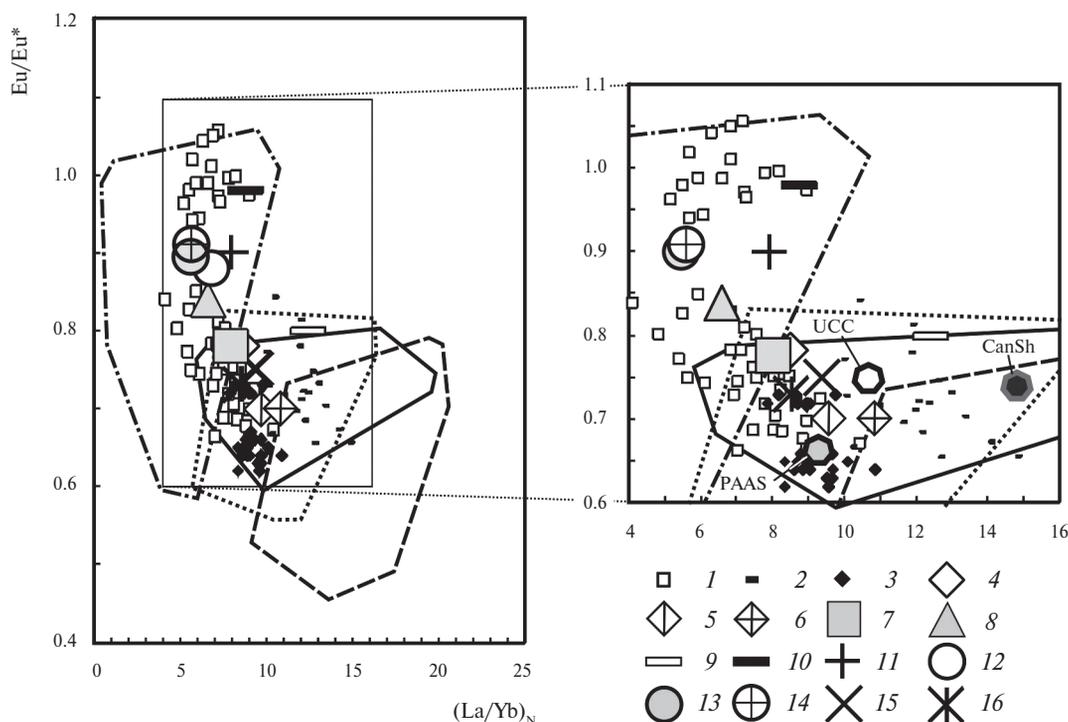


Рис. 4. Положение точек состава взвешенного материала и донных осадков устьевых частей ряда крупных рек Российской Арктики и современных донных осадков восточной части Восточно-Сибирского моря на диаграмме $(La/Yb)_N$ –Eu/Eu*.

1 – р. Сев. Двина и Двинский залив; 2 – р. Лена и ее притоки; 3 – восточная часть Восточно-Сибирского моря; 4–6 – р. Сев. Двина; 7 – р. Обь; 8 – р. Енисей; 9 – р. Лена; 10 – р. Яна; 11 – р. Омолуй; 12 – р. Хатанга; 13 – р. Хета; 14 – р. Котуй; 15 – р. Маккензи; 16 – р. Арктик-Ред-Ривер. 1–3 – данные по индивидуальным пробам; 4 и 7–14 – средние данные по (Савенко, 2006), 5 и 6 – средние данные по (Шевченко и др., 2010) соответственно для взвеси р. Сев. Двины в половодье и летнюю межень. Остальные условные обозначения см. на рис. 3.

северо-западной, сложенной преимущественно архейскими и раннепротерозойскими кристаллическими комплексами, и юго-восточной, в строении которой принимают участие почти исключительно фанерозойские осадочные образования (Маслов и др., 2014). Средние точки взвеси р. Сев. Двины, отобранной в периоды весеннего половодья и летней межени (Шевченко и др., 2010), на диаграмме $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$ по сравнению со «средней точкой взвеси по (Савенко и др., 2004)» сдвинуты в область больших величин $(La/Yb)_N$ и меньших значений Eu/Eu^* , т.е. как будто бы представляют геохимически несколько более зрелый материал, чем тот, аналитические данные для которого приведены в (Савенко и др., 2004; Маслов и др., 2014).

В полях 1 и 2 на диаграмме $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$ локализованы точки состава (индивидуальные пробы) современных донных осадков востока Восточно-Сибирского моря, формирующиеся под влиянием твердого стока р. Колымы, а также средние точки состава взвеси рр. Маккензи и Арктик-Ред-Ривер. Здесь же расположены точки PAAS и UCC. Средняя точка состава пород Канадского щита (Shaw et al., 1967, 1976) благодаря весьма высокому значению $(La/Yb)_N$ (14.42) существенно отличается по своему положению

от позиций подавляющего большинства других как средних, так и индивидуальных точек состава взвеси рек Арктики, хотя и расположена в области перекрытия полей 1, 2 и 3. Наиболее близкое положение к ней занимают как индивидуальные точки состава взвешенного материала р. Лены и ее притоков, так и средняя точка ленской взвеси. Все это подтверждает вывод о том, что взвесь р. Хатанги и ее притоков, а также Енисея является примером материала, сформированного преимущественно за счет «мафического» источника (Rachold, 1999; Martinez et al., 2009), тогда как взвесь Лены, Колымы, Маккензи и Арктик-Ред-Ривер содержит существенно больше материала, образованного за счет эрозии геохимически зрелых субстратов. Близкий к первому источнику состав взвеси имеют также, по всей видимости, рр. Омолой и Яна, хотя высокие содержания Zr, As и Cs во взвешенном материале Яны дают основания предполагать присутствие в пределах ее водосборного бассейна и гранитных интрузий (Levitan et al., 1996; Rachold, 1999).

На диаграмме $(La/Yb)_N - (Eu/Sm)_N$ (рис. 5) отмеченные выше особенности распределения как средних, так и индивидуальных точек состава взвеси рек Российской Арктики и севера Канады вырисовываются, на наш взгляд, более

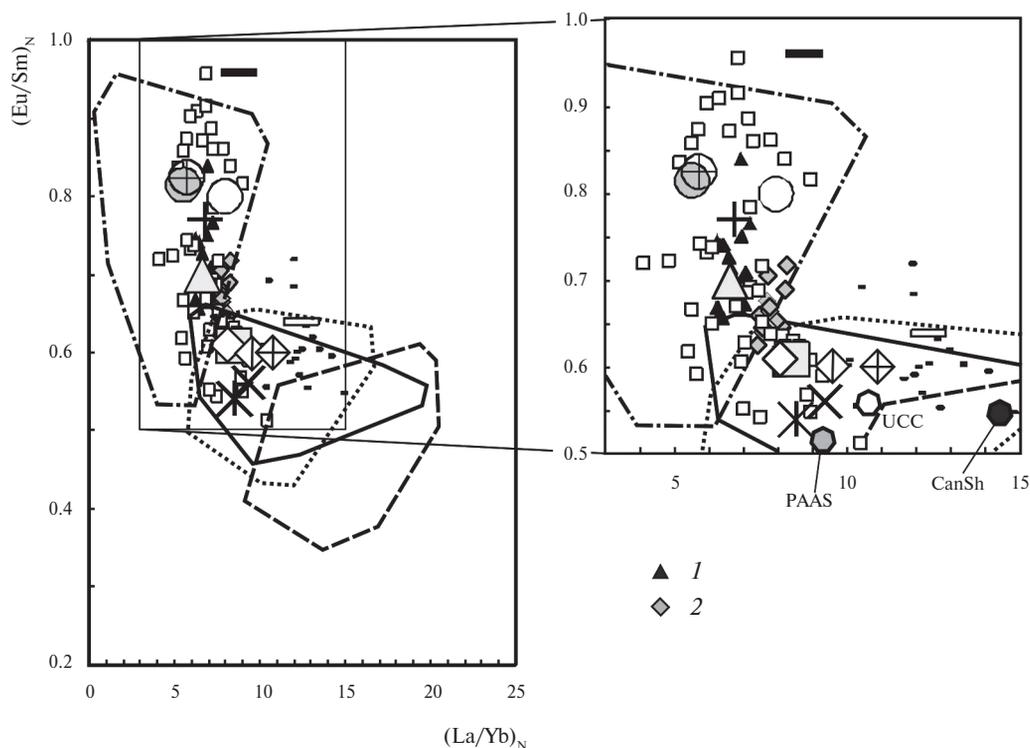


Рис. 5. Положение точек состава взвешенного материала и донных осадков устьевых частей ряда крупных рек Российской Арктики на диаграмме $(La/Yb)_N - (Eu/Sm)_N$. 1 – современные донные осадки эстуария р. Енисей; 2 – то же р. Оби. Остальные условные обозначения см. на рис. 3 и 4.

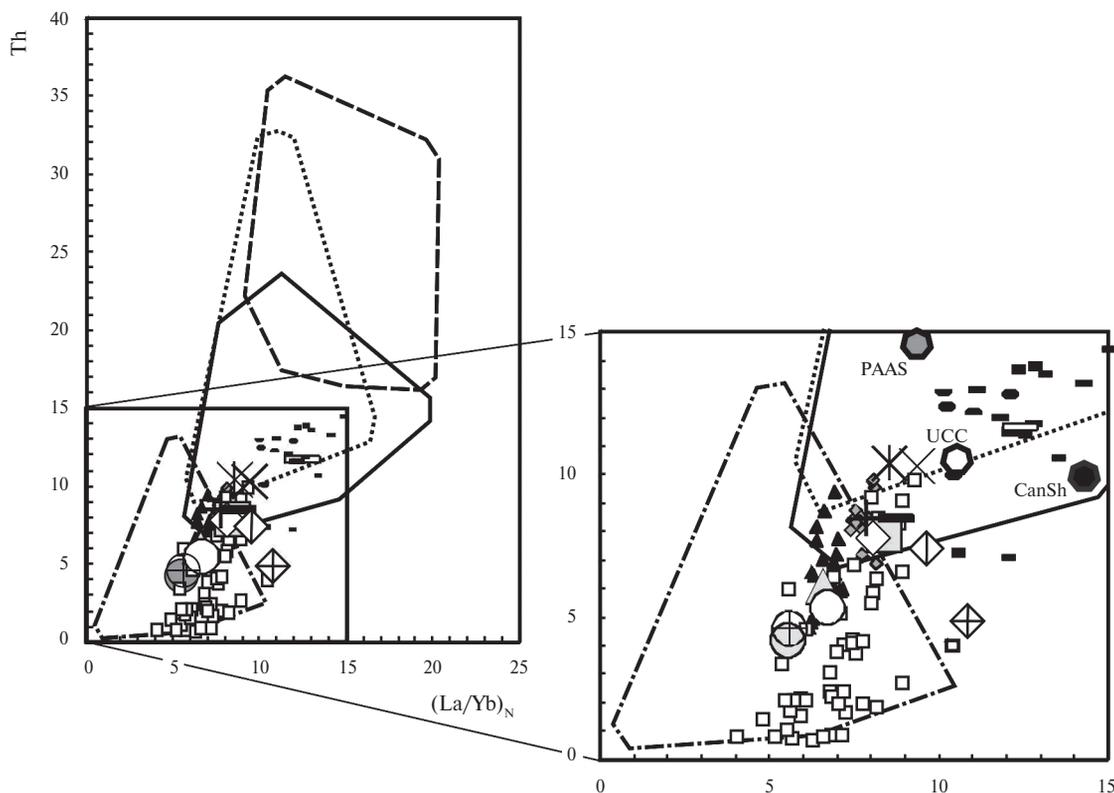


Рис. 6. Положение точек состава взвешенного материала и донных осадков устьевых частей ряда крупных рек Российской Арктики на диаграмме $(La/Yb)_N$ –Th. Условные обозначения см. на рис. 3–5.

четко, чем на графике $(La/Yb)_N$ –Eu/Eu*. В поле 4 (взвесь рек, питающихся продуктами разрушения вулканических пород) сосредоточены средние точки Енисея, Омолоя, Хатанги, Хеты и Котуя, а средняя точка взвешенного материала Яны расположена вне его. В этом же поле находится преобладающая часть индивидуальных точек состава современных донных осадков дельты р. Сев. Двины и Двинского залива, а также практически все точки донных отложений эстуариев Оби и Енисея. Напротив, средние точки взвеси Сев. Двины и Оби (данные В.С. Савенко с соавторами, 2004 и В.П. Шевченко с соавторами, 2010) локализованы в области перекрытия полей 1 и 2. Здесь же располагаются индивидуальные точки проб взвеси Лены и ее притоков, средние точки взвешенного материала Лены, Маккензи и Арктик-Ред-Ривер, а также точки PAAS и UCC. Точка среднего состава пород Канадского щита отвечает области перекрытия полей 1, 2 и 3.

Наконец, на диаграмме $(La/Yb)_N$ –Th (рис. 6) точки всех исследуемых нами в настоящей работе объектов сосредоточены только в полях 1, 2 и 4. Наиболее определенное положение характерно на указанном графике для средних то-

чек взвеси рр. Енисей, Хатанги, Хеты и Котуй, а также индивидуальных точек проб взвешенного материала Сев. Двины. Последние, обладая в большинстве случаев значениями $(La/Yb)_N$ от 5 до 10, сопоставимы со взвесью как крупных рек (реки категории 1), так и рек, дренирующих водосборы, сложенные преимущественно осадочными образованиями (категория 2), но низкие содержания Th в подавляющем большинстве случаев препятствуют такому их позиционированию. Средний состав взвешенного материала р. Лены, по (Gordeev, Shevchenko, 1995; Rachold et al., 1996; Rachold, 1999), а также рр. Маккензи и Арктик-Ред-Ривер на диаграмме $(La/Yb)_N$ –Th отвечает области перекрытия полей 1 и 2. Здесь же расположены точки PAAS и UCC и большая часть точек индивидуальных проб донных осадков Лены и ее притоков. Интересно, что и средняя точка состава пород Канадского щита локализована на данном графике в поле 1. Наименее же определенное положение на диаграмме $(La/Yb)_N$ –Th имеют средние точки взвеси рр. Сев. Двины, Оби, Омолоя и Яны, а также индивидуальные точки проб взвешенного материала эстуариев Оби и Енисея, так как они сосредоточены в области перекрытия полей 1 и 2, с одной

стороны, и поля 4 — с другой. Однако это, в общем, вполне отвечает тому набору комплексов пород, что выступают источниками тонкой алюмосиликокластики для названных рек.

К сожалению, из-за ограниченности объема статьи мы не затронули весьма интересную проблему изменения химического состава донных осадков в зависимости от фациальной обстановки седиментации. Не проведен также сравнительный анализ геохимических характеристик взвеси и поверхностных осадков из одинаковых районов.

Таким образом, суммируя все сказанное выше, можно сделать вывод, что тонкий (пелитовый и алеврито-пелитовый), влекомый реками Российской Арктики в Северный Ледовитый океан и осаждающий преимущественно в их устьевых зонах (маргинальных фильтрах) материал принадлежит в основном к классам взвеси мировых рек 1+2 (крупные реки и реки, дренирующие водосборы, сложенные преимущественно осадочными породами) и 4 (взвешенный материал рек, дренирующих вулканические области), описанным в работе (Вауон et al., 2015). Взвеси, сходные по распределению РЗЭ и Th с материалом, относящимся к категории 3 (взвешенный материал рек, дренирующих преимущественно метаморфические/магматические террейны), для рек Российской Арктики нехарактерны.

Авторы искренне признательны Н.С. Глушковой, выполнившей иллюстрацию к статье. На завершающей стадии работы над рукописью весьма ценными были замечания и советы рецензентов, большинство которых принято нами с благодарностью.

Исследования проведены в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0016) и при финансовой поддержке проектов УрО РАН 15-15-5-4 и 18-9-5-1 (тема АААА-А18-118053090043-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асадулин Э.Э., Мирошников А.Ю., Величкин В.И. (2013) Геохимическая специализация донных осадков в зонах смешения вод Оби и Енисея с водами Карского моря. *Геохимия* (12), 1116–1129.
- Asadulin E.E., Miroshnikov A.Y., Velichkin V.I. (2013) Geochemical signature of bottom sediments in the mixing zones of Ob and Yenisei waters with Kara Sea water. *Geochem. Int.* **51**(12), 1005–1018.
- Асадулин Э.Э., Мирошников А.Ю., Усачева А.А., Величкин В.И. (2015) Геохимическое распознавание терригенного материала из Оби и Енисея в донных отложениях восточной части Карского моря. *ДАН.* **461**(2), 207–209.
- 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.
- Astakhov A.S., Ivanov M.V., Rujian W., Crane K., Aiguo G. (2013) Lithochemical classification of the arctic depositional environments (Chukchi Sea) by methods of multivariate statistical. *Geochem. Int.* **51**(4), 269–289.
- Географический атлас России. (1997) М.: Картография, 164 с.
- Гордеев В.В., Лисицын А.П. (2017) Геохимия поверхностного слоя донных осадков Белого моря. *Система Белого моря*. Т. IV. М.: Научный мир, 576–644.
- Губайдуллин М.Г. (2010) Основные сведения о геологическом строении восточной части водосбора Белого моря. *Система Белого моря. Т. I. Природная среда водосбора Белого моря*. М.: Научный мир, 40–57.
- Гурвич Е.Г., Исаева А.Б., Демина Л.В., Левитан М.А., Муравьев К.Г. (1994) Химический состав донных осадков Карского моря и эстуариев Оби и Енисея. *Океанология* **34**(5), 766–775.
- Дубинин А.В. (2006) Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 360 с.
- Колесник А.Н. (2015) Геохимические особенности современного осадконакопления в Чукотском море. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 142 с.
- Левитан М.А., Буртман М.В., Демина Л.Л., Чудецкий М.Ю., Шостер Ф. (2005) Фациальная изменчивость поверхностного слоя осадков обь-енисейского мелководья и эстуариев Оби и Енисея. *Литология и полез. ископаемые* (5), 472–484.
- 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.
- Лисицын А.П. (1994) Маргинальный фильтр океанов. *Океанология* **34**(5), 735–747.
- 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.
- Лукашин В.Н., Люцарев С.В., Краснюк А.Д., Шевченко В.П., Русаков В.Ю. (2000) Взвешенное вещество в эстуариях Оби и Енисея (по материалам 28 рейса НИС «Академик Борис Петров»). *Геохимия* (12), 1329–1345.
- Lukashin V.N., Lyutsarev S.V., Krasnyuk A.D., Shevchenko V.P., Rusakov V.Yu. (2000) Suspended matter in estuaries of the Ob' and Yenisei rivers: Data from the 28th cruise of R/V Akademik Boris Petrov. *Geochem. Int.* **38**(12), 1221–1236.

- Маслов А.В., Козина Н.В., Ключиткин А.А., Новигатский А.Н., Филиппов А.С., Шевченко В.П. (2016) Распределение ряда редких и рассеянных элементов в современных донных осадках Каспийского моря. *Океанология* **56**(4), 605–617.
- Маслов А.В., Шевченко В.П., Подковыров В.Н., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П., Новигатский А.Н., Филиппов А.С., Шевченко Н.В. (2014) Особенности распределения элементов-примесей и редкоземельных элементов в современных донных осадках нижнего течения р. Северной Двины и Белого моря. *Литология и полез. ископаемые* (6), 463–492.
- Маслов А.В., Шевченко В.П., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П., Новигатский А.Н., Филиппов А.С., Шевченко Н.В. (2012) Систематика Th, Cr, Hf, Co и редкоземельных элементов в современных донных осадках Белого моря и бассейна нижнего течения р. Северная Двина. *ДАН*. **443**(2), 214–220.
- Маслов А.В., Шевченко В.П., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П., Новигатский А.Н., Филиппов А.С., Шевченко Н.В. (2013) Особенности распределения редкоземельных элементов в современных донных осадках Белого моря и нижнего течения Северной Двины. *Океанология* **53**(6), 786–799.
- Мигдисов А.А., Балашов Ю.А., Шарков И.В., Шерстенников О.Г., Ронов А.Б. (1994) Распространенность редкоземельных элементов в главных литологических типах пород осадочного чехла Русской платформы. *Геохимия* (6), 789–803.
- Морозов Н.П., Батурич Г.Н., Гордеев В.В., Гурвич Е.Г. (1974) О составе взвесей и осадков устьевых районов Северной Двины, Мезени, Печоры и Оби. *Гидрохимические материалы* **60**, 60–73.
- Романкевич Е.А., Ветров А.А. (2001) Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 302 с.
- Рубан А.С. (2017) Геохимические особенности современных донных осадков восточной части моря Лаптевых (на примере губы Буор-Хая). Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Томск: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», ФГБУН Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 166 с.
- Савенко В.С. (2006) Химический состав взвешенных наносов рек мира. М.: ГЕОС, 174 с.
- Савенко В.С., Покровский О.С., Дюпре Б., Батурич Г.Н. (2004) Химический состав взвешенного вещества крупных рек России и сопредельных стран. *ДАН*. **398**(1), 97–101.
- Система Белого моря. Т. I. Природная среда водосбора Белого моря (2010) М.: Научный мир, 480 с.
- Филатова Н.И. (1988) Периокеанические вулканогенные пояса. М.: Недра, 264 с.
- Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И., Зарубина Н.В. (2010) Газогеохимические особенности осадков Восточно-Сибирского моря. *Вестник ДВО РАН* (6), 101–108.
- Шевченко В.П., Маслов А.В., Лисицын А.П., Новигатский А.Н., Штайн Р. (2016) Элементный состав осадочного материала дрейфующих льдов Арктики. *География полярных регионов (Сер. Вопросы географии)*. Вып. 142. М.: Кодекс, 390–413.
- Шевченко В.П., Маслов А.В., Лисицын А.П., Новигатский А.Н., Штайн Р. (2017а) Систематика Cr, Co и редкоземельных элементов в осадочном материале дрейфующих льдов северной части круговорота Бофорта. *Литосфера* (3), 59–70.
- Шевченко В.П., Маслов А.В., Штайн Р. (2017б) Распределение ряда редких и рассеянных элементов в осадочном материале, переносимом дрейфующими льдами в районе плато Ермак, Северный Ледовитый океан. *Океанология* **57**(6), 949–959.
- Шевченко В.П., Покровский О.С., Филиппов А.С., Лисицын А.П., Бобров В.А., Богунов А.Ю., Завернина Н.Н., Золотых Е.О., Исаева А.Б., Кокрятская Н.М., Коробов В.Б., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Политова Н.В. (2010) Об элементном составе взвеси реки Северная Двина (бассейн Белого моря). *ДАН*. **430**(2), 686–692.
- Шевченко В.П., Северина О.В., Майорова Н.Г., Иванов Г.В. (1996) Количественное распределение и состав взвеси в эстуариях Оби и Енисея. *Вестник Московского ун-та. Серия 4, геология* (3), 81–86.
- Яшин Д.С. (2000) Голоценовый седиментогенез арктических морей России. *Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона*. Вып. 3. СПб.: ВНИИОкеангеология, 57–67.
- Bayon G., Toucanne S., Skonieczny C., Andre L., Berrnell S., Cheron S., Dennielou B., Etoubleau J., Freslon N., Gauchery T., Germain Y., Jorry S.J., Menot G., Monin L., Ponzevera E., Rouget M.-L., Tachikawa K., Barrat J.A. (2015) Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited. *Geochim. Cosmochim. Acta* **170**, 17–38.
- Bischof J., Koch J., Kubisch M., Spielhagen R.F., Thiede J. (1990) Nordic Seas surface ice drift reconstructions: evidence from ice rafted coal fragments during oxygen isotope stage 6. *Glacimarine Environments: Processes and Sediments*. Dowdeswell J.A., Scourse J.D. (Eds). Geological Society. Special Publ. **53**, 235–251.
- 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.
- Darby D.A., Myers W.B., Jakobsson M., Rigor I. (2011) Modern dirty sea ice characteristics and sources: The role of anchor ice. *J. Geophys. Res.* **116**, C09008, doi:10.1029/2010JC006675.
- 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 Research*. **29**, 265–282.

- Dupré B., Gaillardet J., Rousseau D., Allegre C.J. (1996) Major and trace elements of river borne material: the Congo basin. *Geochim. Cosmochim. Acta* **60**(8), 1301–1321.
- Gaillardet J., Dupré B., Allegre C.J. (1995) A global geochemical mass budget applied to the Congo basin rivers: erosion rates and continental crust composition. *Geochim. Cosmochim. Acta* **59**, 3469–3485.
- Gaillardet J., Dupré B., Allegre C.J. (1999) Geochemistry of large river suspended sediments: silicate weathering or recycling tracer? *Geochim. Cosmochim. Acta* **63**, 4037–4052.
- Gallet S., Jahn B.M., Lanoe B.V.V., Dia A., Rossello E. (1998) Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust. *Earth Planet. Sci. Lett.* **156**, 157–172.
- Goldstein S.J., Jacobsen S.B. (1988) Rare earth elements in river waters. *Earth Planet. Sci. Lett.* **89**, 35–47.
- Gordeev V.V., Beeskov B., Rachold V. (2007) Geochemistry of the Ob and Yenisey estuaries: A comparative study. *Berichte zur Polar- und Meeresforschung* **565**, 235 p.
- Gordeev V.V., Shevchenko V.P. (1995) Chemical composition of suspended sediments in the Lena River and its mixing zone. *Berichte zur Polar- und Meeresforschung* **176**, 154–169.
- Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. (1984) The «North American shale composite»: Its compilation, major and trace element characteristics. *Geochim. Cosmochim. Acta* **48**, 2469–2482.
- Haskin M.A., Haskin L.A. (1966) Rare earths in European shales: a redetermination. *Science* **154**, 507–509.
- Haskin L.A., Wildeman T.R., Frey F.A., Collins K.A., Keedy C.R., Haskin M.A. (1966) Rare earths in sediments. *J. Geophys. Res.* **71**, 6091–6105.
- Hölemann J.A., Schirmacher M., Kassens H., Prange A. (1999) Geochemistry of surficial and ice-rafted sediments from the Laptev Sea (Siberia). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **49**, 45–59.
- Jahn B.M., Gallet S., Han J.M. (2001) Geochemistry of the Xining, Xifeng and Jixian sections, Loess Plateau of China: eolian dust provenance and paleosol evolution during the last 140 ka. *Chem. Geol.* **178**, 71–94.
- Kamber B.S., Greig A., Collerson R.D. (2005) A new estimate for the composition of weathered young upper continental crust from alluvial sediments, Queensland, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta* **69**, 1041–1058.
- Levitan M.A., Dekov V.M., Gorbunova Z.N., Gurvich E.G., Muyakshin S.I., Nürnberg D., Pavlidis M.A., Ruskova N.P., Shelekhova E.S., Vasilkov A.V., Wahsner M. (1996) The Kara Sea: A reflection of modern environment in grain size, mineralogy, and chemical composition of the surface layer of bottom sediments. *Surface-sediment composition and sedimentary processes in the central Arctic Ocean and along the Eurasian Continental Margin*. Stein R., Ivanov G.I., Levitan M.A., Fahl K. (Eds). *Berichte zur Polarforschung* **212**, 58–76.
- Levitan M., Kolesov G., Chudetsky M. (2002) Chemical characteristics of main lithofacies based on instrumental neutron-activation analysis data. *Scientific Cruise Report of the Kara-Sea Expedition 2001 of RV «Akademik Boris Petrov»:* *The German-Russian Project on Siberian River Runoff (SIR-RO) and the EU Project «ESTABLISH»*. Stein R., Stepanets O. (Eds). *Berichte zur Polarforschung* **419**, 101–111.
- Lisitzin A.P., Shevchenko V.P. (2016) Glacial-marine sedimentation. *Encyclopedia of Marine Geosciences*. Harff J., Merschede M., Petersen S., Thiede J. (Eds). Dordrecht: Springer Science+Business Media, 288–294.
- Martin J.M., Hogdahl O., Philippot J.C. (1976) Rare earth element supply to the ocean. *J. Geophys. Res.* **81**(18), 3119–3124.
- Martin J.-M., Meybeck M. (1979) Elemental mass-balance of material carried by major world rivers. *Mar. Chem.* **7**, 173–206.
- Martinez N.C., Murray R.W., Dickens G.R., Kolling M. (2009) Discrimination of sources of terrigenous sediment deposited in the central Arctic Ocean through the Cenozoic. *Paleoceanography* **24**, PA1210, doi:10.1029/2007PA001567.
- Millot R., Gaillardet J., Dupré B., Allegre C.J. (2003) Northern latitude chemical weathering rates: Clues from the Mackenzie River Basin, Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta* **67**, 1305–1329.
- Nance W.B., Taylor S.R. (1976) Rare earth element patterns and crustal evolution – I. Australian post-Archean sedimentary rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta* **61**, 1539–1551.
- Negrel P., Sadeghi M., Ladenberger A., Reimann C., Birke M., GEMAS Project Team (2015) Geochemical fingerprinting and source discrimination of agricultural soils at continental scale. *Chem. Geol.* **396**, 1–15.
- 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 comparison. *Geological history of the polar oceans: Arctic versus Antarctic*. Bleil U., Thiede J. (Eds). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 187–211.
- Pourmand A., Dauphas N., Ireland T.J. (2012) A novel extraction chromatography and MC-ICP-MS technique for rapid analysis of REE, Sc and Y: revising CI-chondrite and Post-Archean Australian Shale (PAAS) abundances. *Chem. Geol.* **291**, 38–54.
- Rachold V. (1999) Major, trace and rare earth element geochemistry of suspended particulate material of East Siberian rivers draining to the Laptev Sea. *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History*. Kassens H., Bauch H.A., Dmitrenko I.A., Eicken H., Hubberten H.-W., Melles M., Thiede J., Timokhov L.A. (Eds). Berlin: Springer, 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 Research* **15**(2), 183–196.
- Reeder S.W., Hitchon B., Levinson A.A. (1972) Hydrogeochemistry of the surface waters of the Mackenzie River drainage basin, Canada—I. Factors controlling inorganic composition. *Geochim. Cosmochim. Acta* **36**, 825–865.
- Reimann C., de Caritat P., GEMAS Project Team, NGS Project Team (2012) New soil composition data for Europe

- and Australia: demonstrating comparability, identifying continental-scale processes and learning lessons for global geochemical mapping. *Sci. Total Environ.* **416**, 239–252.
- Reimnitz E., Dethleff D., Nürnberg D. (1994) Contrasts in Arctic shelf sea-ice regimes and some implications: Beaufort Sea versus Laptev Sea. *Mar. Geol.* **119**, 215–225.
- Rudnick R.L., Gao S. (2003) Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry* **3**, 1–64.
- Shacklette H.T., Boerngen J.G. (1984) Element concentrations in soils and other surficial materials of the conterminous United States: an account of the concentrations of 50 chemical elements of soils and other regoliths. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 1270, 105 p.
- 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., 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.
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) *The Continental Crust: Its Composition and Evolution. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks.* Oxford: Blackwell Scientific Publications, 312 p.
- Viers J., Dupre B., Gaillardet J. (2009) Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: new insights from a new database. *Sci. Total Environ.* **407**, 853–868.
- 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., Pias N., Mammone K. (2003) Sediment source strength, transport pathways and accumulation patterns on the Siberian–Arctic's Chukchi and Laptev shelves. *Continental Shelf Research* **23**, 1201–1225.

REE–Th SYSTEMATICS OF THE SUSPENDED PARTICULATE MATTER AND BOTTOM SEDIMENTS FROM THE MOUTH ZONES OF THE WORLD RIVERS OF DIFFERENT CATEGORIES/CLASSES AND SOME LARGE RUSSIAN ARCTIC RIVERS

A. V. Maslov^a, * and V. P. Shevchenko^b, **

^aZavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620016 Russia

^bShirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

*e-mail: *amas2004@mail.ru, **vshevch@ocean.ru

Received April 24, 2016; in final form, June 19, 2018

The distribution of the rare-earth elements (REE) and Th in the suspended particulate matter (SPM) of some large Russian Arctic rivers and in the bottom sediments from the mouth zones of the world rivers of large categories/classes is compared. It is concluded that the fine (pelite and silt-pelite) material of the Russian Arctic rivers belongs mainly to classes 1 + 2 (large rivers and rivers draining areas made up mainly of sedimentary rocks) and 4 (SPM of rivers draining volcanic areas) of the world rivers. The SPM similar in terms of REE and Th distribution to the bottom sediments of the mouth zones of category/class 3 (rivers draining mainly metamorphic/magmatic terranes) are not typical of the Russian Arctic rivers, except for the SPM of the Lena River similar in terms of $(La/Yb)_N$ and Eu/Eu^* ratio.

Key words: suspended particulate matter (SPM) of rivers, bottom sediments of the mouth zones of rivers, Russian Arctic, REE and Th distribution

(For citation: Maslov A.V., Shevchenko V.P. REE–Th Systematics of the Suspended Particulate Matter and Bottom Sediments from the Mouth Zones of the World Rivers of Different Categories/Classes and Some Large Russian Arctic Rivers. *Geokhimiya*. 2019;64(1):59–78. doi: 10.31857/S0016-752564159-78)