

УДК 551.465

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЯДА РЕДКИХ И РАССЕЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОСАДОЧНОМ МАТЕРИАЛЕ, ПЕРЕНОСИМОМ ДРЕЙФУЮЩИМИ ЛЬДАМИ В РАЙОНЕ ПЛАТО ЕРМАК, СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН

© 2017 г. В. П. Шевченко<sup>1</sup>, А. В. Маслов<sup>2</sup>, Р. Штайн<sup>3</sup><sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия<sup>2</sup>Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия<sup>3</sup>Институт полярных и морских исследований им. А. Вегенера, Бремерхафен, Германия  
e-mails: vshevch@ocean.ru, amas2004@mail.ru, ruediger.stein@awi.de

Поступила в редакцию 12.11.2015 г.

Проанализировано распределение V, Co, Ni, Sr, Nb и редкоземельных элементов (РЗЭ) в осадочном материале, присутствующем во льдах (IRS – ice-rafted sediments), пробы которого отобраны в Арктике в августе 2004 г. в районе плато Ермак в рейсе ARK-XX/3 научно-исследовательского судна “Полярштерн”. Установлено, что по соотношению Nb и V пробы IRS имеют промежуточный характер между средним составом взвеси рек Енисея и Хатанги, а также мезо-кайнозойскими базальтами, с одной стороны, а, с другой – взвесью Оби, Лены и постархейскими австралийскими глинистыми сланцами (PAAS). Это же следует и из распределения РЗЭ. На диаграммах Nb–Sr, Ni–Co и Co–Sr и ряде других графиков точки IRS тяготеют в основном к точкам среднего состава взвеси рек Оби и Лены, т.е. водных артерий, дренирующих водосборы, сложенные преимущественно осадочными образованиями. Содержания Nb, Sr, Ni и Co в IRS близки также к PAAS. Все это позволяет предполагать, что источником материала для исследованных проб могли быть восточная часть моря Лаптевых и Восточно-Сибирское море, на шельфе которых преобладают продукты размыва осадочных и метаморфических пород Верхоянского складчатого пояса.

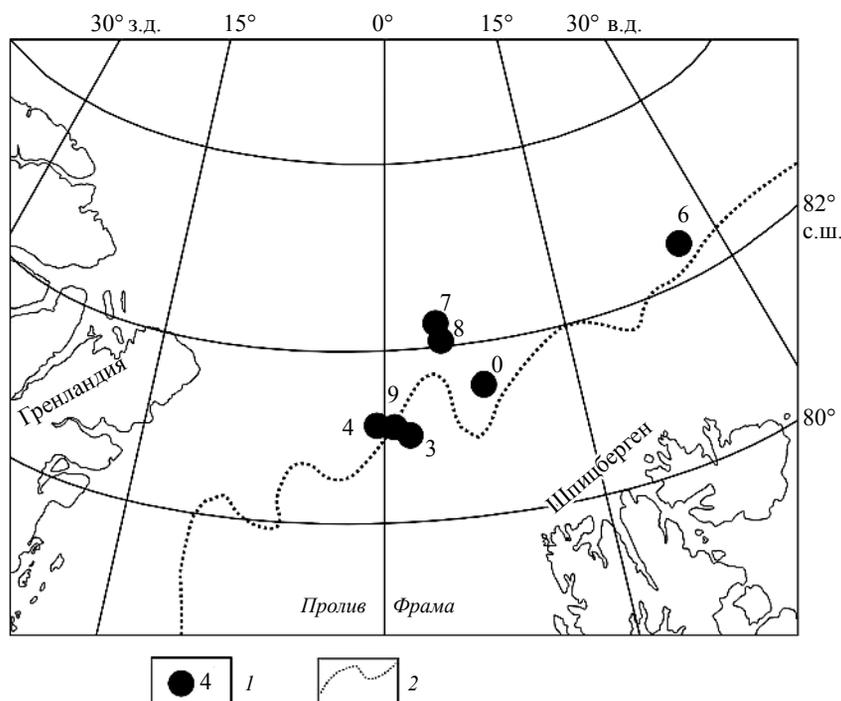
DOI: 10.7868/S0030157417060090

Изучение особенностей транспортировки осадочного вещества в Арктике позволяет как глубже понять процессы современного осадконакопления, так и выполнить экологическую оценку акватории, оказывающей огромное влияние на природную среду планеты [5–10, 15–17, 21–25, 27, 31, 32 и др.]. Транспортировка осадочного материала льдом в Амеразийском бассейне происходит под влиянием антициклонического круговорота Бофорта, а в Евразийском бассейне обусловлена Трансполярным дрейфом. Главная траектория ледовых потоков в Амеразийском бассейне проходит от Чукотского и Восточно-Сибирского морей на востоке до пролива Фрама на западе. Ежегодно последний достигает ~20% льда, генерируемого в Арктическом бассейне, где наиболее важными “фабриками льда” являются море Лаптевых и часть Восточно-Сибирского моря [3, 10, 23]. Дополнительно осадочный материал на дрейфующие льды поступает из атмосферы [8–10, 15–17, 28, 30].

Точное положение источников присутствующего во льдах осадочного материала (IRS – ice-rafted sediments) до настоящего времени дискуссионно. По данным [21], IRS во льдах западной части пролива Фрама содержит мало смектита

и много иллита, что коррелирует с составом глинистой фракции в восточной части моря Лаптевых, а также арктического сектора Северной Америки. В восточной части пролива Фрама в составе IRS много смектита и мало иллита, что типично для западной части моря Лаптевых и Карского моря.

Описанные различия в минералогии донных осадков различных арктических морей отражаются и в их геохимических характеристиках [33, 34], что можно использовать как геохимический трассер источников IRS. Так, осадки Чукотского моря имеют Mg/K, сопоставимые с величинами этого отношения в базальтах. Низкие значения Si/Al и Mg/K, характерные для осадков восточной части моря Лаптевых, дают основания полагать, что последние образованы за счет продуктов размыва областей с высоким содержанием глинистых пород. Высокие Si/Al в осадках у о-ва Врангеля и Новосибирских о-вов указывают на формирование их за счет размыва минералогически зрелых песчаников. Распределение Sr указывает на поступление в восточную часть моря Лаптевых продуктов размыва тонкозернистых обломочных пород, а в западную – незрелых песчаников. Очевидно, однако, что установить конкретные комплексы пород-источников



**Рис. 1.** Станции отбора проб для исследования IRS.

1 – станция и ее номер; 2 – кромка льдов 15.09.2004 г. по спутниковым данным [29].

обломочного материала для шельфа Сибири и, соответственно, IRS во льдах Арктики, на основе приведенной информации можно только в самом общем виде.

Арктическая Сибирь и прилегающие к ней регионы – это совокупность ряда террейнов [18, 26 и др.], обладающих существенной спецификой породных ассоциаций-источников обломочного материала: 1) Западно-Сибирский мегабассейн (осадочные породы); 2) Сибирская платформа (кристаллический фундамент, осадочный чехол и плато-базальты); 3) Верхоянский складчатый пояс (в основном осадочные образования); 4) Колымо-Омолонский супертеррейн (континентальные блоки и островодужные вулканиты); 5) Охотско-Чукотский вулканический пояс (кислые, средние и основные вулканиты); 6) Чукотский террейн (преимущественно осадочные породы).

Дренирующая Западно-Сибирский мегабассейн р. Обь составляет основную массу взвешенного материала, содержащего преимущественно продукты эрозии осадочных пород, в западную часть Карского моря. Взвесь Енисея и, особенно Хатанги, содержит существенную долю продуктов размыва платобазальтов плато Путорана. Этот материал осаждается в восточной части Карского моря и на западе моря Лаптевых. Восточная часть последнего и Восточно-Сибирское море получают обломочный материал в основном за счет рек Лены, Яны, Омоля, Колымы и других, во взвеси которых преобладают продукты разрушения метаморфических

и осадочных образований. Наконец, современные донные осадки Чукотского моря, как отмечено выше, сложены преимущественно или в существенной степени продуктами разрушения основных вулканических пород [33]. Представляется, что химический состав взвешенного материала названных выше рек можно рассматривать как некое приближение к составу источников IRS.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассеянный во льду осадочный материал, речь о котором идет в настоящей работе, собран в рейсе НИС “Полярштерн” в сентябре 2004 г. в Арктике в районе плато Ермак, расположенном к северу от Шпицбергена [29]. На 6 исследованных станциях (рис. 1, табл. 1) он присутствует в виде криоконитовых пеллет длиной 1–10 мм, распределенных в слое льда толщиной 1–2 см на поверхности торосов. На ст. 4 этот материал образует корочки толщиной 2–5 мм на поверхности пологих (до 1 м в высоту) ледяных гребней. Отбор проб производился ножом из нержавеющей стали и пластиковым совком в пластиковые банки. На борту НИС “Полярштерн” обогащенный осадочным материалом лед растапливали при +4 °С, и после декантации влажный IRS хранился при той же температуре.

По данным просмотра слайдов [29], пробы IRS состоят в основном из тонкозернистого материала, содержание фракции 63 мкм в котором

иногда достигает более 80% (табл. 2). Только на ст. 1, расположенной в западной части плато Ермак, в пробе IRS присутствовало ~18% песчаной фракции. В итоге большинство исследованных нами проб представляли собой алеврито-пелитовые образования (глинистые алевриты и алевритистые глины), а одна – песчанистые глинистые алевриты. Наличие в пробе 1 существенной доли песчаной фракции указывает на участие в формировании IRS донного льда или полного промерзания мелководных участков шельфа. В остальных пробах IRS образован, по всей видимости, вследствие захвата терригенной взвеси всплывающими кристаллами льда [9, 10].

Основными минеральными компонентами исследованных проб IRS являются кварц, полевые шпаты, слюда и глинистые минералы. Содержание кварца варьирует от ~17% (ст. 2) до 36.6% (ст. 6). Максимальное количество полевого шпата достигает 21%. В пробах, отобранных на станциях 2, 3 и 7, суммарное количество глинистых минералов составляло более 20%. В западной части плато Ермак (станции 1, 2, 4 и 7) среди IRS диагностированы обломки вулканических стекол (до 1.9%). Суммарное содержание диатомовых, спор и растительного детрита в пробах составляет от 3.7% до 15.9% [29]. Среди тяжелых минералов определены пироксены, амфиболы, эпидот, гранаты, Fe-гидроксиды и черные рудные. Доминируют в тяжелой фракции пироксены и амфиболы, хотя в пробах, отобранных на станциях 1 и 2, преобладают Fe-гидроксиды.

Аликвоты пробы IRS для элементного анализа были высушены при температуре 105 °С и растёрты в агатовой ступке. Содержания элементов в IRS определены методом ICP-MS в ИГГ УрО РАН (аналитики – Д.В. Киселева, Н.Н. Адамович, Н.В. Черденченко, О.А. Березикова и Л.К. Дерюгина) по методике [11, 12]. Точность анализа зависела от содержания конкретного элемента и составляла от 3 до 20–50 отн.% (для очень низких, на уровне предела обнаружения, содержаний).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обратимся теперь к распределению в IRS из района плато Ермак ряда редких и рассеянных (V, Cr, Co, Ni, Sr, Nb), в том числе редкоземельных (РЗЭ), элементов. Выбор указанных элементов обусловлен, во-первых, наличием данных об их содержаниях во взвеси северных рек [13] и, во-вторых, различной концентрацией их в магматических породах основного состава и осадочных образованиях. В качестве эталона первых выбраны мезо-кайнозойские базальты [20], вторых – постархейские австралийские глинистые сланцы (PAAS) [14].

**Таблица 1.** Расположение станций отбора проб транспортируемого дрейфующими льдами осадочного материала (IRS) в районе плато Ермак

№ пробы	Станция	с.ш.	в.д.
IRS-1	0	81°29.96'	08°43.61'
IRS-2	3	81°03.73'	03°09.22'
IRS-3	4	81°07.25'	00°54.96'
IRS-4	6	82°18.21'	25°56.27'
IRS-5	7	82°12.23'	05°41.76'
IRS-6	8	82°02.41'	05°55.67'
IRS-7	9	81°05.70'	02°00.60'

Среднее содержание V, Co и Ni в IRS из района плато Ермак составляет  $157 \pm 24$ ,  $17 \pm 2$  и  $37 \pm 4$  мкг/г (содержания элементов в конкретных пробах приведены в табл. 2). Для Sr и Nb этот же параметр равен  $133 \pm 16$  и  $13 \pm 1$  мкг/г. Во взвеси Оби и Лены концентрация V составляет 127 и 84 мкг/г, Co – 22 и 16 мкг/г, Ni – 59 и 52 мкг/г. Концентрация Sr в обской взвеси равна 102, а Nb – 17 мкг/г [13]. В ленской взвеси два последних элемента присутствуют в количестве 195 и 13 мкг/г. Содержание V, Co и Ni во взвеси Енисея и Хатанги заметно выше. Так, V присутствует в количестве 190 и 349, Co – 34 и 35, а Ni – 113 и 84 мкг/г. Выше, чем во влекомых наносах Оби и Лены, во взвеси Енисея и количество Sr – 245 мкг/г, тогда как содержание Nb несколько ниже.

По данным [14], в PAAS содержание V, Co, Ni, Sr и Nb составляет соответственно 150, 23, 55, 200 и 19 г/т. В средних мезо-кайнозойских базальтах концентрации перечисленных элементов равны 260, 35, 68, 280 и 5 мкг/г [20].

Содержание Sr в исследованных нами пробах IRS составляет от 80 до 97 мкг/г (среднее –  $89 \pm 6$  мкг/г). Во взвеси р. Оби среднее содержание Sr составляет порядка 100 мкг/г, во взвеси р. Енисея – 110 мкг/г (это в точности равно концентрации данного элемента в PAAS), а во взвеси р. Лены – всего 66 мкг/г [13]. В среднем мезо-кайнозойском базальте содержание хрома заметно выше (150 мкг/г) [20]. По данным [1], содержание хрома в осадках эстуария р. Енисея варьирует от 78 до 121 мкг/г, составляя в среднем 109 мкг/г. Для эстуария Оби, по тем же данным, среднее содержание хрома на 13 мкг/г ниже, а пределы вариаций составляют 83–112 мкг/г. Среднее содержание Sr в современных донных осадках Чукотского моря равно, по данным [2, 4], ~73 мкг/г (минимум – 24, максимум – 92 мкг/г). Для осадков восточной части Восточно-Сибирского моря параметр Sr среднее составляет  $74 \pm 14$  мкг/г (минимум – 31, максимум – 106 мкг/г) [4]. По данным этих же работ, средние содержания Co и La в современных донных осадках восточной

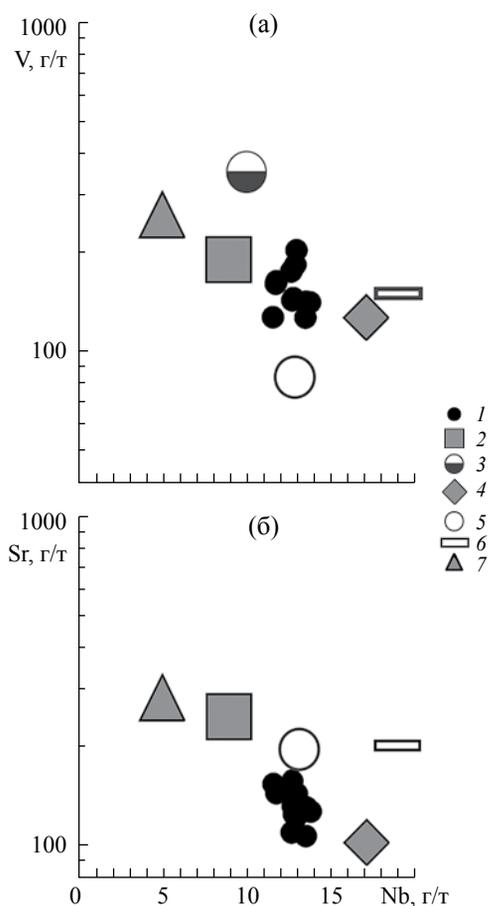
**Таблица 2.** Содержание различных фракций и химических элементов в транспортируемом дрейфующими льдами осадочном материале (район плато Ермак)

Содержание разных фракций (%) * и элементов (мкг/г)	Пробы											
	IRS-1	IRS-2	IRS-3-1**	IRS-3-2**	IRS-4	IRS-5	IRS-6	IRS-7-1**	IRS-7-2**	IRS-31***	IRS-37***	IRS-71***
Песчаная фракция	18	1.2	2.1	8.6	3.6	3.9	1.1	2.1	1.1	41.9	2.1	1.1
Алевритовая фракция	46	34.1	41.9	62	64	55	30.5	41.9	30.5	41.9	41.9	30.5
Пелитовая фракция	36	64.7	56	29.4	32.4	41.1	68.4	56	68.4	56	56	68.4
V	161	127	142	127	164	177	175	143	183	143	145	203
Cr	85.7	97.1	85.2	79.7	90.3	95.5	92.4	83.4	95.2	83.4	84.7	120
Co	15.9	13.6	17.8	13.5	15.6	16.3	19.3	17.4	19.8	17.4	17.7	20.5
Ni	33.6	32.8	38.2	31.3	34.9	37.2	41	36.3	41.6	36.3	37.5	42.5
Sr	144	107	130	154	147	157	109	132	121	132	125	143
Nb	11.7	13.5	13.5	11.6	11.8	12.7	12.6	12.7	12.9	12.7	12.8	13
La	25	21.8	29.3	21.4	22	26.4	24.5	28.4	27.9	28.4	26.2	31.7
Ce	53.6	44	55	46.1	46.1	56.3	47.7	61.4	54.1	61.4	57.7	67.3
Pr	6.41	5.37	6.90	5.59	5.65	6.43	5.88	7.08	6.76	7.08	6.55	7.89
Nd	24.5	19.6	25.3	21.4	21.1	24.8	21.7	25.3	25.3	25.6	24.1	29.2
Sm	4.78	3.77	4.57	4.29	4.18	4.93	4.08	4.92	4.76	4.92	4.50	5.53
Eu	1.24	1.03	1.05	1.11	1.11	1.22	0.99	1.18	1.11	1.18	1.11	1.37
Gd	5.01	4.13	4.66	4.77	4.42	5.3	4.36	5.3	4.92	5.3	4.85	5.91
Tb	0.66	0.5	0.58	0.65	0.58	0.67	0.52	0.64	0.62	0.64	0.6	0.75
Dy	3.89	2.90	3.44	3.58	3.44	3.8	3.01	3.63	3.58	3.63	3.46	4.46
Ho	0.77	0.62	0.66	0.74	0.67	0.78	0.60	0.72	0.70	0.72	0.71	0.93
Er	2.22	1.77	1.94	2.09	2	2.21	1.61	2.14	1.97	2.14	2.07	2.63
Tm	0.33	0.26	0.28	0.3	0.3	0.33	0.24	0.33	0.29	0.33	0.32	0.37
Yb	2.42	1.89	1.71	2.26	1.97	2.1	1.65	2.1	1.8	2.1	1.97	2.43
Lu	0.33	0.28	0.27	0.29	0.29	0.34	0.24	0.32	0.27	0.32	0.31	0.37

\* По данным просмотра смер-слайдов [29] с использованием шкалы Крамбейна (песчаная фракция от 2 мм до 63 мкм, алевритовая фракция от 63 до 4 мкм, пелитовая фракция меньше 4 мкм).

\*\* Параллельное определение лабораторий.

\*\*\* Параллельное определение по зашифрованным пробам (данные для IRS-3-1, IRS-3-2, IRS-31 и IRS-37 представляют пробу осадочного материала, отобранную на ст. 4; данные для IRS-7-1, IRS-7-2 и IRS-71 представляют пробу, отобранную на ст. 9).



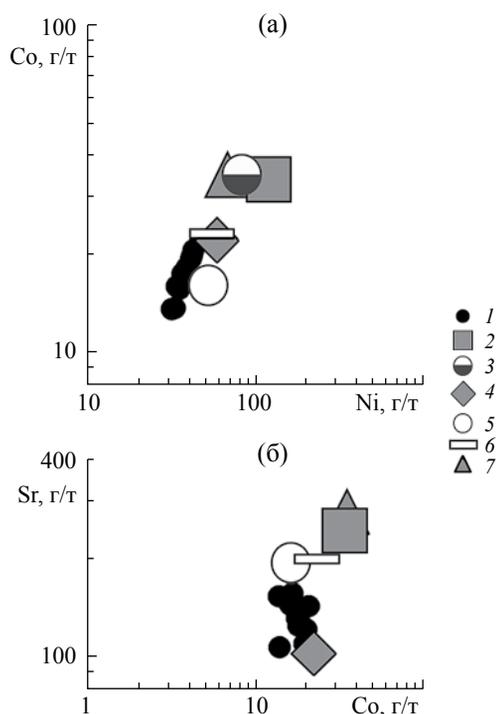
**Рис. 2.** Положение точек состава IRS, а также взвеси рек Енисея, Хатанги, Оби и Лены [13] на диаграммах Nb–V (а) и Nb–Sr (б).  
 1 – точки состава IRS; 2 – взвесь р. Енисея; 3 – взвесь р. Хатанги; 4 – взвесь р. Оби; 5 – взвесь р. Лены; 6 – PAAS [14]; 7 – средний состав базальтов мезо-кайнозоя [20].

части Восточно-Сибирского моря составляют 12 (5–34) мкг/г и 20 (10–25) мкг/г, а в осадках Чукотского моря – 12 (1–27) и 26 (19–35) мкг/г.

На диаграмме Nb–V<sup>1</sup> точки состава IRS из района плато Ермак занимают промежуточное положение между точками среднего состава взвеси, с одной стороны, Енисея и Хатанги, а также мезо-кайнозойских базальтов, а, с другой, – взвеси Оби и Лены, а также PAAS (рис. 2а).

На диаграммах Nb–Sr, Ni–Co и Co–Sr положение точек IRS несколько иное. На диаграмме Nb–Sr они по содержанию Nb почти сопоставимы со взвесью р. Лены (и с PAAS), но несколько отличаются от нее по содержанию Sr (рис. 2б). На диаграмме Ni–Co точки IRS также в основном

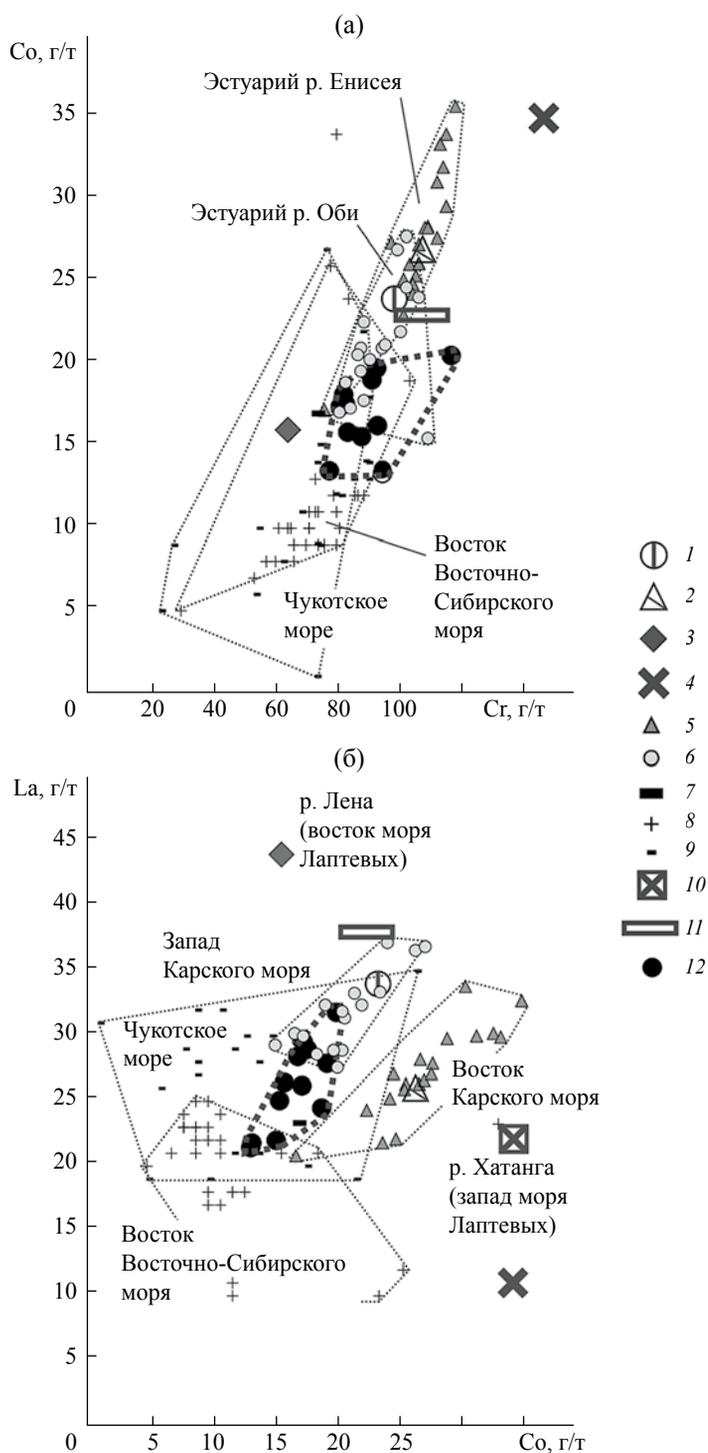
<sup>1</sup> При построении этой и всех других диаграмм использованы также данные параллельных и контрольных определений содержаний в пробах редких и рассеянных элементов.



**Рис. 3.** Положение точек состава пробы IRS, а также взвеси рек Енисея, Хатанги, Оби и Лены [13] на диаграммах Ni–Co (а) и Co–Sr (б).  
 1 – точки состава IRS; 2 – взвесь р. Енисея; 3 – взвесь р. Хатанги; 4 – взвесь р. Оби; 5 – взвесь р. Лены; 6 – PAAS [14]; 7 – средний состав базальтов мезо-кайнозоя [20].

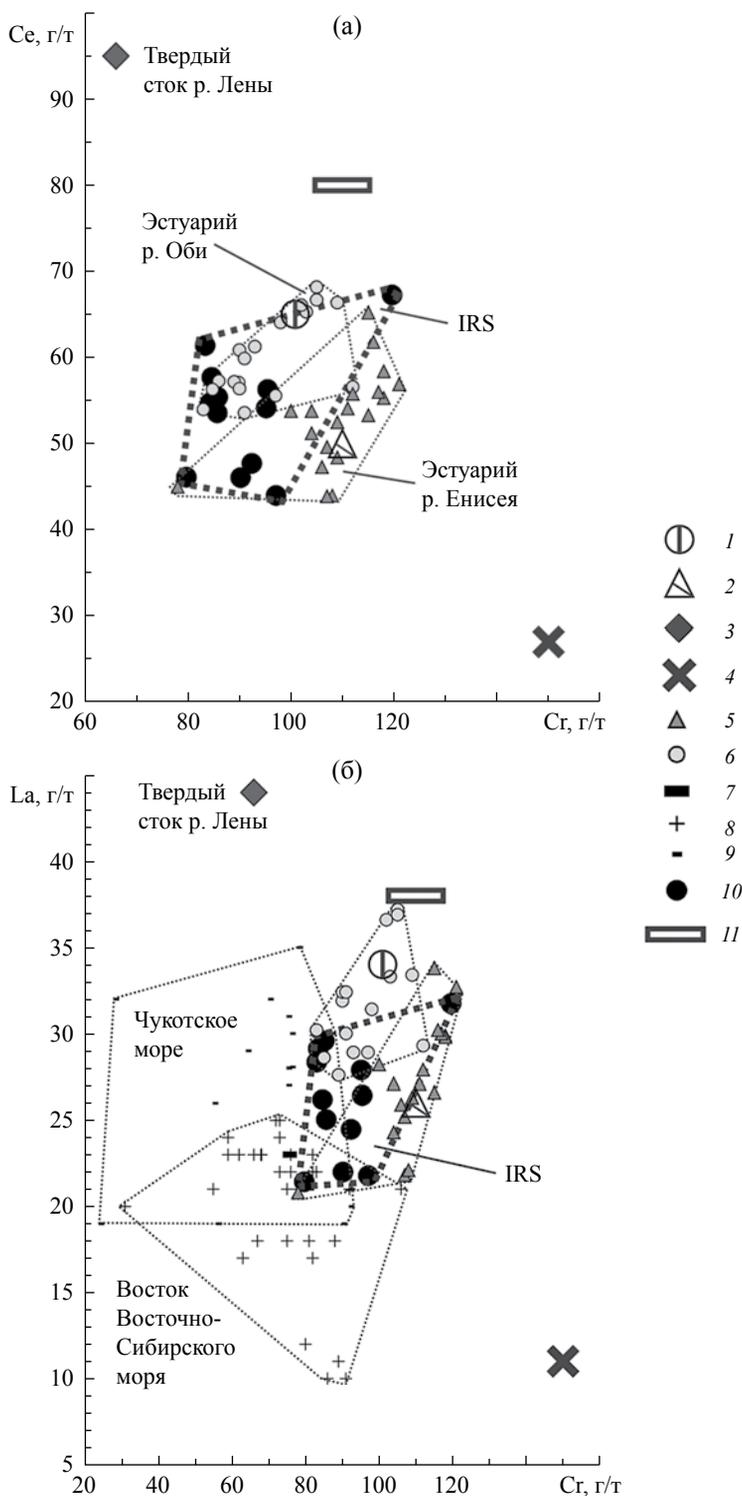
тяготеют к среднему составу взвеси Оби и Лены и к точке PAAS (рис. 3а). Примерно такое же положение свойственно им и на диаграмме Co–Sr (рис. 3б). Таким образом, на перечисленных диаграммах точки состава IRS тяготеют в основном к точкам состава взвеси крупных речных артерий, дренирующих водосборы, сложенные преимущественно осадочными образованиями.

На диаграмму Sr–Co (рис. 4а) кроме уже перечисленных выше объектов для сравнения нами вынесены данные по индивидуальным пробам современных донных осадков эстуариев рек Енисея и Оби (данные из [1]), а также по индивидуальным пробам, отобраным на востоке Восточно-Сибирского и в Чукотском морях (материалы из [2, 4]). Анализ диаграммы показывает, что IRS из района плато Ермак отличаются от осадков эстуария Енисея заметно более низкими концентрациями Co, а от осадков Чукотского моря и восточной части Восточно-Сибирского моря, напротив, повышенными содержаниями Co. Как и на приведенных выше диаграммах содержания Sr и Co в рассматриваемых нами пробах наиболее сопоставимы с концентрациями названных элементов в твердом стоке (взвеси) рек Оби и Лены [13] и PAAS.



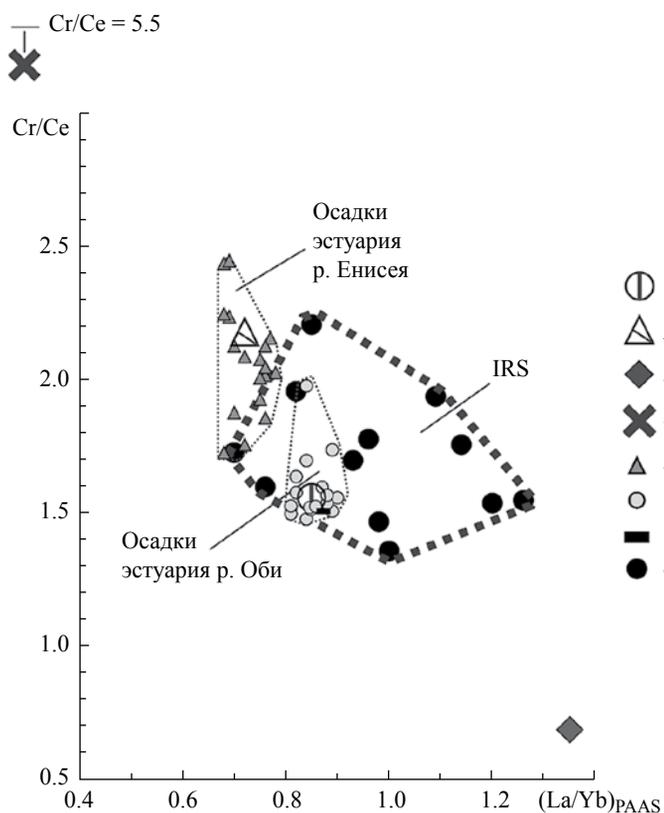
**Рис. 4.** Положение точек состава проб IRS, а также современных донных осадков ряда морей Российской Арктики [1, 2, 4, 19] и взвеси ряда рек [13] на диаграммах Sr–Co (а) и Co–La (б).

1 – взвесь р. Оби; 2 – взвесь р. Енисея; 3 – взвесь р. Лены; 4 – средний состав мезо-кайнозойских базальтов [20]; 5 – осадки эстуария р. Енисея; 6 – осадки эстуария р. Оби; 7 – современные донные осадки Чукотского моря (среднее); 8 – то же восточной части Восточно-Сибирского моря (индивидуальные пробы); 9 – то же Чукотского моря; 10 – взвесь р. Хатанги; 11 – PAAS [14]; 12 – точки состава IRS.



**Рис. 5.** Положение точек состава исследованных проб IRS, а также современных донных осадков ряда морей Российской Арктики [1, 2, 4, 19] и взвеси ряда рек [13] на диаграммах Sr–Ce (а) и Sr–La (б).

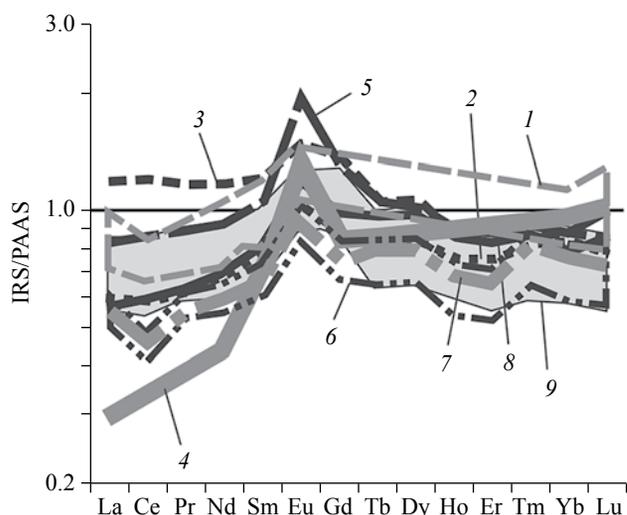
1 – взвесь р. Оби; 2 – взвесь р. Енисея; 3 – взвесь р. Лены; 4 – средний состав мезо-кайнозойских базальтов [20]; 5 – осадки эстуария р. Енисея; 6 – осадки эстуария р. Оби; 7 – современные донные осадки Чукотского моря (среднее); 8 – современные донные осадки восточной части Восточно-Сибирского моря (индивидуальные пробы); 9 – то же Чукотского моря; 10 – точки состава IRS; 11 – PAAS [14].



**Рис. 6.** Распределение точек состава IRS, взвеси сибирских рек [13] и современных донных осадков эстуариев Оби и Енисея [1] на диаграмме  $(La/Yb)_{PAAS}-Cr/Ce$ .

1 – взвесь р. Оби; 2 – взвесь р. Енисея; 3 – взвесь р. Лены; 4 – средний состав мезо-кайнозойских базальтов [20]; 5 – осадки эстуария р. Енисея; 6 – осадки эстуария р. Оби; 7 – современные донные осадки Чукотского моря (среднее); 8 – точки состава IRS.

Определенным недостатком приведенной выше диаграммы является существенное перекрытие полей составов взвеси и современных донных осадков различных районов Российской Арктики. Несколькo меньше это проявлено на диаграмме  $Co-La$  (рис. 4б), хотя и здесь можно видеть существенное перекрытие полей составов современных донных осадков востока Восточно-Сибирского и Чукотского морей. Существенно иное положение присуще здесь осадкам востока Карского моря, а также средним точкам состава мезо-кайнозойских базальтов и твердого стока (взвеси) рек Хатанги и Лены. Точки состава IRS занимают на диаграмме  $Co-La$  положение между полями составов индивидуальных проб осадков из эстуария р. Оби и полями современных донных осадков востока Восточно-Сибирского моря. И первые, и вторые представлены, как было показано выше, продуктами размыва преимущественно осадочных (и, в какой-то мере, метаморфических) образований.



**Рис. 7.** Нормированное по PAAS распределение PЗЭ в IRS из района плато Ермак, взвеси ряда сибирских рек [13], а также в донных осадках Чукотского моря [19].

1 – взвесь р. Оби; 2 – взвесь р. Енисея; 3 – взвесь р. Лены; 4 – средний состав мезо-кайнозойских базальтов [20]; 5 – взвесь р. Яны; 6 – разные типы осадков Чукотского моря (пески, алевритистые пески, песчанистые алевриты, песчанисто-алевоитовые пелиты, пелитовые алевриты); 7 – средний состав современных донных осадков Чукотского моря; 8 – взвесь р. Хатанги; 9 – состав исследованных проб IRS.

Существенное сходство полей состава IRS и осадков эстуариев Оби и, в какой-то мере, Енисея наблюдается на диаграмме  $Cr-Ce$  (рис. 5а). Это же свойственно и распределению точек IRS на диаграмме  $Cr-La$  (рис. 5б), однако здесь достаточно хорошо видно, что поля составов современных донных осадков востока Восточно-Сибирского и Чукотского морей отличаются от полей осадков эстуариев Оби и Енисея, а также положения средних точек состава твердого стока названных рек и точки PAAS. Весьма обособленные позиции занимают на данной диаграмме, как и на диаграмме  $Co-La$ , также точки среднего состава твердого стока р. Лены и мезо-кайнозойских базальтов.

На диаграмме  $(La/Yb)_{PAAS}-Cr/Ce$  точки IRS демонстрируют достаточно широкий разброс значений как  $(La/Yb)_{PAAS}$ , так и  $Cr/Ce$  (рис. 6). При этом поле составов современных донных осадков эстуария р. Оби оказывается практически на 100% вписанным в поле IRS, а поле осадков эстуария р. Енисея имеет не более чем 5-ти процентное перекрытие с полем IRS. По сравнению с полем IRS поля состава осадков эстуариев и Оби, и Енисея характеризуются на рассматриваемом графике существенно более узкими вариациями  $(La/Yb)_{PAAS}$  и  $Cr/Ce$ .

Спектры распределения РЗЭ в IRS, нормированные по PAAS, приведены на рис. 7. Здесь же представлены аналогичные спектры для речной взвеси Енисея и Хатанги, Лены и Яны, мезо-кайнозойских базальтов и различных типов современных донных осадков Чукотского моря (заимствовано из [19]) и среднее по ним. Средние значения  $(La/Yb)_{PAAS}$  и  $(La/Sm)_{PAAS}$  в IRS составляют  $0.98 \pm 0.18$  и  $0.84 \pm 0.06$  (таким образом, в целом спектры распределения плоские с относительно небольшой положительной Eu аномалией, т.е. существенный вклад в их формирование внесли, скорее всего, породы осадочные). Для взвеси Енисея и Хатанги указанные параметры несколько ниже —  $0.73 \pm 0.01$  и  $0.75 \pm 0.04$  (для мезо-кайнозойских базальтов, по Конди [20], значения  $(La/Yb)_{PAAS}$  и  $(La/Sm)_{PAAS}$  составляют 0.30 и 0.41). Для взвеси Лены и Яны они, напротив, несколько выше —  $1.15 \pm 0.28$  и  $0.89 \pm 0.14$ . Средняя величина  $(La/Yb)_{PAAS}$  для осадков Чукотского моря ( $n = 26$ ) составляет 0.73, при этом для разных типов осадков она в заметной степени варьирует (пески — 0.98, алевритистые пески — 0.77, пелитовые алевриты — 0.65) [19]. Это показывает, что в составе современных донных осадков Чукотского моря присутствует определенная доля продуктов размыва пород основного состава, как это предполагалось и ранее [33].

### ВЫВОДЫ

Приведенные в настоящей работе данные показывают, что пробы IRS, отобранные в западной Арктике в районе плато Ермак, близки по особенностям распределения ряда редких и рассеянных элементов, а также РЗЭ к продуктам разрушения осадочных и метаморфических пород, но, возможно, содержат определенную долю основной кластики. С учетом всего сказанного выше и того обстоятельства, что льды из западной части Карского моря, источником IRS для которых выступает, по всей видимости, взвесь р. Оби, по статистике достаточно редко достигают района плато Ермак, можно предполагать, что источником материала для исследованных нами проб IRS, могли быть восточная часть моря Лаптевых и Восточно-Сибирское море, на шельфе которых преобладают продукты размыва осадочных и метаморфических пород Верхоянского складчатого пояса.

Авторы благодарят экипаж НИС “Полярштерн” и F. Schoster, I. Mende, J. Schneider, D. Penschorn, B. Bahr, H.S. Noffke, S. Nam, A. Puhg и A. Winkler за помощь в отборе проб, Н.А. Кукину за литологическое описание проб, академика А.П. Лисицына за поддержку. Рисунки к статье выполнены Н.С. Глушковой.

Исследования проведены в рамках государственного задания Института океанологии

им. П.П. Ширшова РАН (проекты № 0149-2014-0026 и № 0149-2016-0001) и при финансовой поддержке проекта УрО РАН № 15-15-5-4.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асадулин Э.Э., Мирошников А.Ю., Величкин В.И. Геохимическая специализация донных осадков в зонах смешения вод Оби и Енисея с водами Карского моря // Геохимия. 2013. № 12. С. 1116–1129.
2. Астахов А.С., Ван Р., Крейн К. и др. Литохимическая типизация обстановок полярного осадконакопления (Чукотское море) методами многокомпонентного статистического анализа // Геохимия. 2013. № 4. С. 303–325.
3. Захаров В.Ф. Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 213 с.
4. Колесник А.Н. Геохимические особенности современного осадконакопления в Чукотском море. Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2015. 142 с.
5. Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р. Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики в течение последних 130 тыс. лет. М.: ГЕОС, 2007. 404 с.
6. Левитан М.А., Сыромятников К.В., Кузьмина Т.Г. Некоторые литолого-геохимические особенности современной и четвертичной седиментации в Северном Ледовитом океане // Геохимия. 2012. № 7. С. 627–643.
7. Лисицын А.П. О типах морских отложений, связанных с деятельностью льдов // Докл. АН СССР. 1958. Т. 118. № 2. С. 373–376.
8. Лисицын А.П. Процессы океанской седиментации. Литология и геохимия. М.: Наука, 1978. 392 с.
9. Лисицын А.П. Ледовая седиментация в Мировом океане. М.: Наука, 1994. 448 с.
10. Лисицын А.П. Новый тип седиментогенеза в Арктике — ледовый морской, новые подходы к исследованию процессов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 1. С. 18–60.
11. Маслов А.В., Крупенин М.Т., Киселева Д.В. Литогеохимия тонкозернистых алюмосиликокластических пород серебрянской серии венда Среднего Урала // Геохимия. 2011. № 10. С. 1032–1062.
12. Маслов А.В., Шевченко В.П., Подковыров В.Н. и др. Особенности распределения элементов-примесей и редкоземельных элементов в современных донных осадках нижнего течения р. Северной Двины и Белого моря // Литология и полезные ископаемые. 2014. № 6. С. 463–492.
13. Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира. М.: ГЕОС, 2006. 174 с.

14. *Тейлор С.Р., МакЛеннан С.М.* Континентальная кора, ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 376 с.
15. *Шевченко В.П., Виноградова А.А., Иванов Г.И. и др.* Распределение и состав аэрозолей Западной Арктики // Докл. РАН. 1997. Т. 355. № 5. С. 673–676.
16. *Шевченко В.П., Лисицын А.П., Куницын В.М. и др.* Состав аэрозолей в приземном слое атмосферы над морями западного сектора Российской Арктики // Океанология. 1999. Т. 39. № 1. С. 142–151.
17. *Шевченко В.П., Лисицын А.П., Полякова Е.И. и др.* Распределение и состав осадочного материала в снежном покрове дрейфующих льдов Арктики (пролив Фрама) // Докл. РАН. 2002. Т. 383. № 3. С. 385–389.
18. *Bogdanov N.A., Tilman S.M.* Tectonics and Geodynamics of Northeastern Asia, Explanatory Notes, Tectonic Map of Northeastern Asia. Institute of the Lithosphere, Russian Academy of Sciences in cooperation with Circum-Pacific council for Energy and Mineral Resources, Moscow, Russia: 1993. P. 1–29.
19. *Chen Z., Gao A., Liu Y. et al.* REE geochemistry of surface sediments in the Chukchi Sea // Science in China Series D: Earth Sciences. 2003. V. 46. № 6. P. 603–611.
20. *Condie K.C.* Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // Chem. Geol. 1993. V. 104. P. 1–37.
21. *Dethleff D., Kuhlmann G.* Fram Strait sea-ice sediment provinces based on silt and clay compositions identify Siberian Kara and Laptev seas as main source areas // Polar Research. 2010. V. 29. P. 265–282.
22. *Lisitzin A.P.* Sea-ice and iceberg sedimentation in the Ocean: recent and past. Berlin: Springer, 2002. 563 p.
23. *Lisitzin A.P., Shevchenko V.P.* Glacial-marine sedimentation // Encyclopedia of Marine Geosciences. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2016. P. 288–294.
24. *Meese D.A., Reimnitz E., Tucker III W.B. et al.* Evidence for radionuclide transport by sea ice // The Science of the Total Environment. 1997. V. 202. P. 267–278.
25. *Nürnberg D., Wollenburg I., Dethleff D. et al.* Sediments in Arctic sea ice: Implications for entrainment, transport and release // Marine Geology. 1994. V. 119. P. 185–214.
26. *Parfenov L.M.* Accretionary History of Northeast Asia // International Conference on Arctic Margins Proceedings. U.S. Department of the Interior Mineral Management Service, Alaska Outer Continental Shelf Region, Anchorage, Alaska: 1992. P. 183–188.
27. *Pfirman S., Lange M.A., Wollenburg I., Schlosser P.* 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 / Eds. Bleil U., Thiede J. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990. P. 187–211.
28. *Shevchenko V.* Aerosols over the Russian Arctic seas // Seabed morphology of the Russian Arctic shelf / Ed. Nikiforov S. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2010. P. 87–92.
29. *Shevchenko V., Kukina N.* Ice-rafted sediments // Scientific cruise report of the Arctic expedition ARK-XX/3 of RV “Polarstern” in 2004: Fram Strait, Yermak Plateau and East Greenland continental margin / Ed. Stein R. Berichte zur Polar- und Meeresforschung. 2005. № 517. P. 15–21.
30. *Shevchenko V., Lisitzin A., Vinogradova A., Stein R.* Heavy metals in aerosols over the seas of the Russian Arctic // The Science of the Total Environment. 2003. V. 306. P. 11–25.
31. *Stein R.* Arctic Ocean sediments: processes, proxies and paleoenvironment. Developments in marine geology. 2<sup>nd</sup> edition. Amsterdam: Elsevier, 2008. 592 p.
32. *The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean / Eds. Stein R., Macdonald R.W.* Berlin – New York: Springer, 2004. 363 p.
33. *Viscosi-Shirley C.* 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. 2001. 178 p.
34. *Viscosi-Shirley C., Piasias N., Mammone K.* Sediment source strength, transport pathways and accumulation patterns on the Siberian–Arctic’s Chukchi and Laptev shelves // Continental Shelf Research. 2003. V. 23. P. 1201–1225.

## **Distribution of Some Trace Elements in the Ice-Rafted Sediments in the Area of Yermak Plateau, the Arctic Ocean**

**V. P. Shevchenko, A. V. Maslov, R. Stein**

The distribution of V, Co, Ni, Sr, Nb and rare earth elements (REE) in ice-rafted sediments (IRS) collected in the Yermak Plateau (the Arctic Ocean) during ARK- XX/3 cruise of the R/V Polarstern in September 2004 has been analyzed. It was determined that Nb/V ratio in these IRS has an intermediate value between its values in suspended particulate matter of the Yenisey and Khatanga rivers and MZ-KZ basalts from the one hand and suspended particulate matter of the Ob and Lena rivers and Post-Archean Australian shale (PAAS). The distribution of REE demonstrates the same peculiarities. The IRS points at Nb-Sr, Ni-Co, Co-Sr, and some other diagrams are generally confined to the points of the average composition of suspended particulate matter of the draining catchment areas of the Ob and Lena rivers where sedimentary rocks dominate. The content of Nb, Sr, Ni and Co in the studied IRS is close to their content in PAAS. Thus, we conclude that the main sources of studied IRS are located in the eastern Laptev Sea and East Siberian Sea on their shelves where the products of weathering of sedimentary and metamorphic rocks of Verkhoyansk folded belt dominate.