

ГЕОХИМИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ДОННЫХ ОСАДКОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ПАЦИФИКИ

В.В. Саттарова, К.И. Аксентов

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

Проведено исследование распределения и фракционирования редкоземельных элементов (РЗЭ) в поверхностных осадках Северо-Западной Пацифики. Содержание РЗЭ находится в пределах от 30 до 106 мг/кг, иттрия — от 9.34 до 24.5 мг/кг. Донные отложения, расположенные рядом с Курило-Камчатской дугой, обеднены РЗЭ по сравнению с отложениями абиссальной равнины Тихого океана, Курильской котловины Охотского моря и северо-западной части Берингова моря. Влияние питающих провинций и литодинамической обстановки на уровень содержания и состав РЗЭ в осадках выражается в положительной корреляции отношения LREE/HREE с гранулометрическим составом, значениями Rb/Sr, Nb/Y и отрицательной со значениями Zr/Rb. Изменчивость валового состава РЗЭ обусловливается вариативностью содержания легких РЗЭ.

Редкоземельные элементы, донные осадки, Курильская котловина, Охотское море, Берингово море, Тихий океан.

GEOCHEMISTRY OF RARE-EARTH ELEMENTS IN THE SURFACE BOTTOM SEDIMENTS OF THE NORTHWESTERN PACIFIC

V.V. Sattarova and K.I. Aksentov

The distribution and fractionation of rare-earth elements in the Northwest Pacific surface sediments are studied. The REE contents in the sediments were 30–106 mg/kg, and the Y contents ranged from 9.34 to 24.5 mg/kg. The bottom sediments located near the Kuril–Kamchatka arc were depleted in REE as compared with the sediments of the abyssal plain of the Pacific, the Kuril basin of the Sea of Okhotsk, and the northwestern Bering Sea. The effect of distributive provinces and lithodynamic setting on the REE composition and REE contents in the sediments was expressed as a positive correlation of the LREE/HREE ratio with the grain composition, Rb/Sr, and Nb/Y and its negative correlation with Zr/Rb. The variations in the bulk REE composition were due to the variations in LREE contents.

Rare-earth elements, bottom sediments, Kuril Basin, Sea of Okhotsk, Bering Sea, Pacific

ВВЕДЕНИЕ

Редкоземельные элементы (РЗЭ) представляют собой группу элементов с уникальными геохимическими характеристиками, обусловленную их химическими свойствами, характеризуемыми 4f-электронными конфигурациями [Henderson, 1984]. Лантаноиды в трехвалентном состоянии ведут себя как когерентная группа элементов в геохимических процессах, тогда как церий (Ce) и европий (Eu) меняют в природных условиях свои степени окисления на 4⁺ и 2⁺ соответственно. Эти уникальные свойства Ce и Eu по сравнению с соседними РЗЭ позволяют использовать аномалии Ce и Eu в качестве чувствительных геохимических индикаторов для палеоклиматических и палеогеографических реконструкций морских отложений [Dou et al., 2010].

Данные по поведению РЗЭ в морских и океанических осадках были приведены неоднократно в работах советских, российских и иностранных исследователей [Балашов, 1976; Li, 1982; Дубинин, Волков, 1986; Murray et al., 1991; Bailey, 1993; Ootosaka et al., 2000; Батурин, Юшина, 2007; Akagi et al., 2011; Дубинин и др., 2013; Саттарова и др., 2014; Zou et al., 2015; Sattarova, Artemova, 2015; Аксентов, Саттарова, 2016]. Геохимия РЗЭ в осадках изучалась как на отдельных полигонах, так и методом профилей через различные фашиальные зоны океана [Toyoda et al., 1990; Дубинин, 1994, 1998; Стрекопытов, Дубинин, 1996; Дубинин, Свальнов, 2001, 2003; и др.]. Показано, что с удалением в пелагиаль увеличивается накопление РЗЭ в осадках океанов относительно терригенных отложений прибрежных акваторий. Связано это с сорбцией РЗЭ (особенно легких) из океанских вод глинистыми минералами и гидрогенными оксигидроксидами железа и марганца, доля которых растет в пелагиали [Волков, Фомина, 1973;

Гурвич и др., 1980]. Состав РЗЭ в глинистых осадках периферии континентов в целом близок к составу РЗЭ в сланцах (северо-американский глинистый сланец NASC, PAAS и др.), хотя и несколько обеднен тяжелыми лантаноидами [Тейлор, Мак-Леннан, 1988; Дубинин, 2006]. В тихоокеанских международных водах были обнаружены глубоководные донные отложения, обладающие высокой концентрацией редкоземельных элементов. В отмеченных районах Тихого океана концентрация редких земель в донных отложениях выше, чем во многих материковых месторождениях, разрабатываемых сегодня в Китае [Kato et al., 2011].

В осадках дальневосточных морей подобные исследования достаточно редки. Приведены данные по содержанию и фракционированию РЗЭ в кернах глубоководного бурения во впадине Ямато Японского моря [Murray et al., 1991]. Рассмотрено влияние литологии осадков и диагенетических процессов на состав РЗЭ. При изучении РЗЭ в осадках Амурского залива Японского моря [Аксентов, Саттарова, 2016] показано, что миграция и накопление лантаноидов контролируется литодинамическими процессами, главным образом минералогическим составом питающих провинций. Донные отложения на поднятии Академия наук в южной части Охотского моря имеют значительную положительную аномалию Се, которая связывается с образованием оксидов Fe-Mn [Zou et al., 2015]. В Беринговом море изучено распределение РЗЭ в поровых водах и во взвеси [Akagi et al., 2011; Soyol-Erdene, Nuh, 2013]. В работе [Аникиев и др., 1997] рассмотрено распределение и седиментационные потоки химических элементов, в том числе и РЗЭ в донных отложениях и взвеси на полигоне в морской части эстуария р. Анадырь—Берингово море.

В работе на основании новых данных, полученных с помощью современных экспрессных и высокоточных аналитических методов, сделана попытка проследить закономерности распределения РЗЭ и иттрия в донных отложениях Северо-Западной Пацифики, рассмотреть взаимосвязь лантаноидов с гранулометрическим составом, органическим веществом и другими химическими элементами.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Курильская котловина Охотского моря. Глубоководная Курильская котловина с максимальной глубиной 3521 м, расположенная на юге Охотского моря, относится к задуговым впадинам [Мазарович, 2011]. В плане котловина имеет форму клина, сужающегося к северу. В рельефе она представляет собой абиссальную равнину, которая оконтуривается по изобате 3000 м [Родников и др., 2005]. В ее юго-западной части развит осадочный чехол мощностью 4000—7000 м. Формирование котловины в условиях растяжения происходило с раннего олигоцена до позднего миоцена; в раннем плиоцене началось ее активное погружение [Мазарович, 2011]. Осадочные отложения котловины подразделяются на две толщи. Верхняя сложена переслаивающимися турбидитами и вулканогенными осадками (пеплов) и охватывает миоцен-четвертичный стратиграфический интервал. Нижняя — пелагическими глинами и аргиллитами с редкими прослоями вулканического материала. Возраст толщи, учитывая скорость осадконакопления, устанавливается как мел-палеогеновый [Родников и др., 2005].

Северо-западная часть Тихого океана. С океанической стороны Курило-Камчатского желоба по самому краю ложа Тихого океана протягивается пологое поднятие — вал Зенкевича. Он имеет высоту всего 200—400 м над прилегающим ложем океана при ширине до 180—250 миль. На юго-востоке поверхность вала постепенно переходит в равнину океанского ложа. Над сводовой частью вала, лежащей на глубинах порядка 5000—5500 м, возвышается ряд сравнительно низких (100—300 м) холмов и несколько высоких гор, поднимающихся вершинами до глубин 1700—1900 м. Примечательны понижения и поднятия поверхности вала, имеющие ориентировку вкрест его общего простирания [Строение..., 1981]. Тихоокеанский склон Курило-Камчатского желоба преимущественно сложен сильноизмененными подушечными лавами плагиоклазовых и пироксен-плагиоклазовых базальтов. Кроме базальтов в строении фундамента принимают участие осадочные кремнисто-глинистые и песчаные породы, метаморфизированные осадочные и вулканогенные породы [Васильев и др., 1986]. Для данного района характерна активная вулканическая деятельность [Удинцев, 1955; Безруков, 1955]. Поступающий со смежных участков суши терригенный и пирокластический материал разбавляет органическое вещество во взвеси. На условия осадконакопления в изучаемом районе оказывает влияние Курило-Камчатское течение, которое несет в основном беринговоморские воды. Глубина Курильских проливов в значительной степени определяет условия водообмена северо-западной части Тихого океана с Охотским морем [Rogachev, Verkhunov, 1995].

Берингово море. Самое большое из дальневосточных морей, омывающих берега России, — Берингово море. Оно отделено от Тихого океана цепью Алеутских и их западным продолжением — Командорскими островами. Максимальная глубина составляет 4420 м, что равно средней глубине Тихого океана [Лисицын, 1966]. Берингово море находится на границе ледовой и умеренной зон. Внешний склон Алеутской островной дуги осложнен многочисленными уступами и террасами. Берингово море

по геолого-геофизическим особенностям и рельефу может быть разделено на две области. Южнее расположена возвышенность Обручева, которая представляет собой обширное подводное поднятие по изобате 4000 м с глубинами вершинной поверхности порядка 3500 м. Мощность осадочного слоя изменяется от 1000 до 2000 м. По данным А.П. Лисицына [1966], в Беринговом море распространены осадки разных типов — терригенные, биогенные, вулканогенные, а также смешанные осадки, возникающие при одновременном действии нескольких факторов осадкообразования. Из биогенных осадков наиболее характерны диатомовые и спикулевые кремнистые осадки. Большие площади занимает рассеянный гравийно-галечный материал, перенесенный льдами и накапливающийся на самых различных глубинах. Для шельфов южной части моря характерно распространение вулканогенных осадков — от грубых до мелкоалевритовых илов. Близость к Тихому океану сказывается в накоплении в ряде мест фораминиферных осадков, а также довольно обширных площадей кремнево-губковых песков. Для материковых склонов Берингова моря наиболее типичны крупные алевриты, а в нижней части присутствуют мелкоалевритовые и алевритоглинистые илы, в основном терригенные. В ряде мест развиты линзы и вытянутые ленты песков и гравийно-галечных отложений, приуроченных к выходам коренных пород.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В работе были использованы образцы поверхностных осадков, полученные в ходе международных научных экспедиций на НИС «Sonne» (So223, 2012 г.) и НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (LV55, 2011 г.; LV63, 2013 г.; LV71, 2015 г.) (рис. 1). Координаты станций приведены в табл. 1.

Анализ гранулометрического состава проб выполнялся на лазерном анализаторе размерности частиц ANALYSETTE 22 (FRITZSCH, Германия) по отработанной методике [Боцул, 2002].

Содержание общего органического углерода было определено на анализаторе TOC-VCPN с приставкой для сжигания твердых проб SSM-5000A (SHIMADZU, Япония). Относительное стандартное отклонение общего углерода составило 1.5 %; неорганического углерода — 2.0 %.

Общий химический анализ выполнялся в Центре коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН. Для литохимического анализа отобранные пробы высушивались в сушильном шкафу при температуре 30—50 °С до воздушно-сухого состояния. Пробы подготавливали методом открытого кислотного разложения. Определение содержаний РЗЭ выполняли методом ИСП-МС на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 с (Agilent Technologies, США) с использованием в качестве внутреннего стандарта ^{115}In при конечной концентрации его в растворе 10^{-7} %. Содержания других элементов определялись методом ИСП-АЭС на спектрометре iCAP 6500Duo (Thermo Electron Corporation, США) с добавлением внутреннего стандарта раствора кадмия (концентрация 10^{-4} %). Правильность определения содержания элементов подтверждена анализом ГСО осадочных отложений: ООПЕ 402 (ил кремнистый), ООПЕ 201 (ил вулканно-терригенный).

Результаты по РЗЭ принято представлять в нормированном виде, чтобы исключить влияние разной распространенности РЗЭ. Наиболее широко используется нормирование на северо-американский сланец NASC [Gromet et al., 1984]. Величины фракционирования европия и церия рассчитывались по формулам: $\text{Eu}_{\text{ан}} = 2 \times \text{Eu}/\text{Eu}^N / (\text{Sm}/\text{Sm}^N + \text{Gd}/\text{Gd}^N)$; $\text{Ce}_{\text{ан}} = 2 \times \text{Ce}/\text{Ce}^N / (\text{La}/\text{La}^N + \text{Nd}/\text{Nd}^N)$ соответственно [Дубинин, 2006].

Отношение легких РЗЭ к тяжелым рассматривалось как $\text{LREE}/\text{HREE} = (\text{La}/\text{La}^N + 2 \times \text{Pr}/\text{Pr}^N + \text{Nd}/\text{Nd}^N) / (\text{Er}/\text{Er}^N + \text{Tm}/\text{Tm}^N + \text{Yb}/\text{Yb}^N + \text{Lu}/\text{Lu}^N)$. Этот вариант отношения легких и тяжелых РЗЭ основан на большом количестве элементов и менее подвержен влиянию ошибок анализа при определении отдельных лантаноидов.

База данных химических элементов была обработана статистическими методами: корреляционным и кластерным анализами. Так как исходные концентрации имеют разные шкалы, выполнялась стандартизация (z -преобразование). В данной работе использован один из видов кластерного анализа — метод Варда (Ward's method). В качестве меры сходства (сродства) использовалось евклидово расстояние (дистанция, измеряемая в условных единицах). Кластерный анализ проводился в Q -технике, что позволило сгруппировать станции, имеющие схожие геохимические параметры. Для кластерного анализа брались только данные по элементному составу, что является, по нашему мнению, более правильной мерой для определения геохимической типизации осадков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Суммарные содержания РЗЭ и иттрия в донных отложениях представлены на рис. 1. В целом выделяются три зоны максимального содержания РЗЭ — северо-западная часть Берингова моря (ст. LV63-20, LV63-23), абиссальная равнина Тихого океана (ст. 1(A1), 6(C2), 9(D1)) и глубоководная часть Курильской котловины Охотского моря (ст. LV71-1, LV71-2, LV55-48). В площадном распределении иттрия наблюдается другая картина. Рассмотрим подробнее каждый район исследования.

Таблица 1. Координаты, глубина и гранулометрический состав проб донных отложений Северо-Западной Пацифики

Станция	Координаты		Глубина, м	Гранулометрический состав, %		
	с.ш.	в.д.		> 0.063 мм	0.004—0.063 мм	< 0.004 мм
Курильская котловина Охотского моря						
LV71-1	46°08.8'	146°00.0'	3481	0	46	54
LV71-2	46°41.08'	147°27.99'	3352	0	53	47
LV71-3	46°38.002'	148°59.995'	3363	0	46	54
LV71-4	47°12.005'	149°36.992'	3366	0	67	33
LV71-5	48°37.261'	150°00.315'	1700	0	71	29
LV71-6	48°02.960'	150°00.292'	3351	2	55	43
LV71-7	46°57.020'	151°5.011'	3300	4	65	31
LV71-11	45°36.300'	146°23.100'	3206	0	44	56
LV55-9	49°31.255'	153.27.141'	1937	0	78	21
LV55-41	48°9.488'	147°8.372'	1639	0	49	51
LV55-42	46°56.91'	147°12.289'	3354	0	43	57
LV55-45	47°18.395'	145°10.358'	2426	0	78	21
LV55-48	45°33.14'	144°19.964'	767	0	55	45
Северо-западная часть Тихого океана						
LV55-4	43°24.743'	147°36.978'	2909	1	76	24
LV71-9	46°16.086'	152°02.101'	3430	2	74	24
LV71-10	46°07.870'	152°12.182'	4722	0	71	29
1(A1)	43°58.190'	157°19.796'	5412	0	68	31
2(A2)	46°14.024'	155°33.100'	4869	0	67	33
3(A3)	47°14.261'	154°42.319'	4976	1	78	21
4(B1)	46°58.001'	154°32.703'	5767	0	57	43
5(B2)	43°34.990'	153°57.964'	5378	8	67	25
6(C2)	42°29.002'	153°59.905'	5297	1	71	28
7(C1)	43°02.217'	152°59.129'	5222	1	77	22
8(D3)	42°14.614'	151°43.506'	5127	0	76	24
9(D1)	40°35.012'	150°59.630'	5401	0	63	37
11(E1)	40°12.891'	148°06.042'	5349	0	67	33
12(E2)	39°43.417'	147°10.014'	5229	0	72	28
LV63-3	50°12.6995'	157°28.5013'	1495	46	37	17
LV63-4	51°37.5235'	167°49.7646'	2951	11	63	26
LV63-5	52°29.0948'	165°49.9814'	3131	21	56	23
LV63-8	53°33.9217'	164°27.5782'	3083	22	52	26
LV63-33	54°20.0411'	162°07.1840'	1465	14	58	28
LV63-40	52°59.2205'	160°56.5172'	2927	34	43	22
LV63-44	52°30.9397'	160°16.9615'	1668	2	62	37
Берингово море						
LV63-9	55°23.0315'	167°24.9123'	2560	3	71	26
LV63-12	57°11.0513'	169°40.2556'	1888	0	73	27
LV63-15	59°14.3871'	170°46.4688'	794	67	20	14
LV63-20	60°23.1146'	179°47.2203'	1125	3	78	20
LV63-23	61°08.9513'	176°45.6812'	1891	3	74	23

Курильская котловина Охотского моря. По гранулометрическому составу осадки Курильской котловины Охотского моря представлены пелит-алеуритовыми и алеурит-пелитовыми илами оливкового цвета с большим содержанием диатомовых водорослей. Поверхностные осадки в интервале 1—6 см жидкие и полужидкие илы.

В осадках Курильской котловины содержание органического углерода варьирует в пределах 0.84—1.92 %, среднее 1.45 %; кремния 26.15—31.20 %, среднее 28.82 % (табл. 2). По сравнению с осад-

Таблица 2. Химический состав донных отложений Северо-Западной Пацифики

Станция	Элемент																					
	мас. %							мг/кг														
	C _{орг}	Si	Al	Fe	Mn	Ca	Ti	Mg	K	Li	Nb	Cs	Cr	Hf	Th	U	Sc	Pb	Rb	Sr	Zn	Zr
Курильская котловина Охотского моря																						
LV71-1	1.92	26.86	4.83	3.04	1.75	0.75	0.23	1.31	1.54	28.94	5.47	4.71	48.25	1.42	4.84	1.33	9.41	22.53	68.16	201	109.3	54.05
LV71-2	1.56	29.11	5.30	3.45	0.30	0.72	0.24	1.31	1.65	31.38	5.51	5.21	47.08	1.52	4.87	1.22	10.57	18.73	73.35	160	119.2	57.38
LV71-3	1.45	29.29	4.95	3.29	0.25	1.01	0.23	1.34	1.43	26.75	4.48	4.39	39.67	1.41	4.10	1.06	11.11	20.73	59.46	167	119.9	53.93
LV71-4	1.18	27.99	4.86	3.39	3.12	1.48	0.25	1.27	1.11	36.16	3.48	3.21	30.88	1.38	2.99	1.35	13.76	16.28	44.37	207	105.8	49.89
LV71-5	1.34	30.79	3.52	2.35	0.35	1.53	0.17	1.12	0.90	14.54	2.15	1.98	24.24	0.93	1.97	0.86	9.21	16.12	28.48	195	88.9	38.10
LV71-6	1.24	27.68	3.47	2.41	3.87	1.14	0.18	1.23	0.99	48.88	2.60	2.44	24.27	1.05	2.39	1.42	9.40	16.02	34.34	208	102.5	41.87
LV71-7	0.84	27.47	5.50	4.03	1.69	2.44	0.30	1.41	0.89	29.57	2.04	1.94	20.13	2.94	1.75	0.82	19.58	14.58	26.07	244	94.9	52.30
LV71-11	1.83	26.15	4.48	2.87	2.60	0.74	0.22	1.22	1.56	29.21	6.45	4.54	48.07	1.68	5.82	2.16	9.55	25.08	66.57	208	95.9	55.33
LV55-9	1.38	31.20	3.70	2.37	0.04	1.99	0.18	1.03	0.72	9.81	1.22	1.12	20.43	1.00	1.32	0.99	11.10	9.66	17.35	215	53.8	38.97
LV55-41	1.40	30.30	4.45	2.96	0.50	0.75	0.21	1.15	1.40	26.95	4.65	3.83	41.21	1.35	4.76	1.31	10.23	23.06	58.66	185	125	52.75
LV55-42	1.75	28.05	4.73	3.07	2.12	0.71	0.23	1.21	1.56	38.64	5.39	4.71	47.11	1.49	5.64	1.57	10.60	22.48	70.60	201	112.6	59.59
LV55-45	1.67	30.42	4.83	2.96	0.18	0.68	0.24	0.99	1.60	27.02	5.82	3.97	44.96	1.48	5.59	1.46	9.15	16.49	69.80	186	68.9	53.07
LV55-48	1.28	29.37	5.30	3.59	0.06	0.75	0.25	1.09	1.77	31.74	6.78	5.07	52.62	1.75	6.57	1.59	10.07	20.45	83.00	187	74.7	63.03
Среднее	1.45	28.82	4.61	3.06	1.29	1.13	0.23	1.21	1.32	29.20	4.31	3.63	37.61	1.49	4.05	1.32	11.06	18.63	53.86	197	97.80	51.56
Стд. откл.	0.30	1.59	0.67	0.50	1.31	0.57	0.04	0.13	0.35	9.76	1.83	1.35	11.91	0.50	1.76	0.36	2.84	4.27	21.22	22	21.45	7.62
Северо-западная часть Тихого океана																						
LV55-4	1.34	31.08	3.52	2.15	0.10	2.03	0.17	0.99	0.73	10.65	1.88	1.57	17.62	1.17	1.68	0.98	9.84	12.43	20.91	175	66.73	43.43
LV71-9	1.55	28.68	6.20	4.35	0.13	3.15	0.34	1.44	0.80	12.19	1.69	1.33	23.70	1.68	1.42	0.69	21.74	9.52	19.14	262	78.9	56.11
LV71-10	0.95	28.99	4.86	3.37	0.25	1.84	0.26	1.35	1.00	15.77	3.21	1.76	28.32	1.33	1.90	0.99	15.73	12.32	25.87	208	76.2	53.39
1(A1)	0.81	28.58	5.90	3.31	0.39	1.38	0.26	1.38	1.31	23.00	4.30	4.15	34.10	2.11	4.44	1.28	13.20	25.20	51.30	239	86.30	87.00
2(A2)	0.81	28.69	5.97	3.75	0.36	1.59	0.31	1.50	1.28	24.20	3.92	3.91	37.30	2.15	4.32	1.39	16.50	22.60	50.60	259	99.70	92.20
3(A3)	1.55	28.34	5.38	3.60	0.15	1.83	0.30	1.58	1.09	22.00	2.86	2.70	37.00	1.77	2.76	1.32	13.70	13.80	36.50	231	83.70	71.00
4(B1)	0.98	27.33	6.99	4.97	0.19	3.07	0.42	1.89	1.08	18.90	2.82	2.52	37.10	1.81	2.74	1.09	18.30	14.10	34.50	295	88.20	73.60
5(B2)	0.78	28.86	5.84	3.12	0.30	1.56	0.25	1.24	1.25	21.40	4.23	4.05	24.10	2.25	4.41	1.32	13.50	24.00	47.40	247	79.40	96.00
6(C2)	0.69	27.73	6.38	3.18	0.32	1.65	0.27	1.28	1.40	22.60	4.59	4.74	27.70	2.42	5.05	1.30	13.40	26.90	55.00	245	80.50	101.00
7(C1)	0.44	31.84	6.57	2.46	0.21	1.67	0.19	0.75	1.17	18.10	3.74	3.29	13.70	3.02	3.73	1.21	9.87	19.80	36.50	239	73.10	119.00
8(D3)	0.58	30.25	6.41	2.64	0.28	1.94	0.22	0.89	1.21	18.70	3.86	3.65	9.80	2.89	3.87	1.26	11.20	20.40	39.00	236	73.80	110.00
9(D1)	1.36	27.09	5.95	3.36	0.95	0.97	0.27	1.39	1.63	39.80	5.90	6.13	43.70	1.97	6.80	1.75	14.00	34.60	74.20	206	121.20	94.60
11(E1)	1.45	26.20	5.11	3.05	1.02	0.94	0.24	1.32	1.35	35.80	5.09	4.85	32.40	1.79	5.39	1.68	11.70	27.90	60.90	192	117.00	76.20
12(E2)	1.40	28.65	5.20	3.12	0.60	1.00	0.24	1.27	1.31	28.60	5.21	4.79	38.30	1.91	5.37	1.69	11.90	27.30	59.90	188	93.60	79.00
LV63-3	0.79	27.65	7.98	5.37	0.10	4.32	0.43	1.73	1.05	13.74	2.11	1.82	48.93	1.88	1.47	0.73	23.21	6.73	27.25	339	94.79	68.39

LV63-4	0.79	21.95	5.02	2.86	0.15	10.86	0.25	1.18	1.13	16.23	2.85	1.94	29.61	1.65	2.21	0.82	11.64	12.75	30.03	566	74.87	66.41
LV63-5	0.57	24.92	6.68	3.63	0.23	7.62	0.33	1.44	1.19	16.19	2.81	1.69	39.95	2.03	2.11	0.77	15.86	10.47	29.36	451	86.74	84.49
LV63-8	0.57	28.97	7.20	4.00	0.22	3.53	0.38	1.59	1.37	17.52	3.49	1.77	48.56	2.26	2.35	0.88	16.66	10.21	33.72	333	93.39	92.17
LV63-33	1.06	27.41	7.46	4.77	0.07	3.27	0.40	2.11	1.36	23.65	2.67	1.83	91.54	1.83	1.78	0.88	20.33	7.25	31.81	303	94.96	69.65
LV63-40	1.54	27.74	6.16	3.94	0.06	2.47	0.35	1.86	1.33	23.53	2.84	1.97	64.08	1.77	1.92	1.13	17.58	7.98	33.17	264	102.89	67.10
LV63-44	0.93	27.43	7.79	4.93	0.08	3.88	0.42	1.92	1.19	17.43	2.30	1.54	73.98	1.80	1.43	0.78	22.18	6.86	26.86	331	96.22	68.87
Среднее	0.97	28.02	6.12	3.62	0.29	2.88	0.30	1.44	1.20	20.95	3.45	2.95	38.17	1.98	3.20	1.14	15.34	16.82	39.23	277	88.68	79.60
Стд. откл.	0.37	2.07	1.07	0.87	0.26	2.38	0.08	0.34	0.20	7.12	1.14	1.42	19.53	0.44	1.60	0.32	4.03	8.39	14.60	92	14.03	18.92
Берингово море																						
LV63-9	1.69	29.80	5.79	3.19	0.04	2.23	0.28	1.60	1.16	19.33	2.55	1.57	64.17	1.68	1.03	1.56	12.87	6.22	28.40	307	97.53	62.83
LV63-12	1.92	29.71	5.44	3.17	0.04	1.72	0.29	1.39	1.42	28.38	5.05	3.38	72.73	3.81	1.62	1.70	12.72	9.22	52.34	230	132.92	67.49
LV63-15	0.70	31.83	6.45	3.46	0.04	1.91	0.33	1.16	1.76	24.37	5.22	2.55	91.70	3.44	1.11	1.57	12.55	8.30	55.19	291	73.53	59.61
LV63-20	1.65	31.62	5.59	2.99	0.04	2.00	0.33	1.29	1.54	23.33	6.72	2.75	70.64	5.06	1.78	1.47	11.98	10.41	56.66	225	99.28	57.16
LV63-23	1.76	31.58	5.29	2.89	0.03	1.92	0.31	1.26	1.52	24.68	6.55	3.00	71.08	5.09	1.83	1.37	11.46	9.56	58.91	229	98.68	54.84
Среднее	1.54	30.91	5.71	3.14	0.04	1.96	0.31	1.34	1.48	24.02	5.22	2.65	74.06	3.82	1.47	1.53	12.32	8.74	50.30	256	100.4	60.38
Стд. откл.	0.48	1.06	0.45	0.22	0.01	0.18	0.02	0.17	0.22	3.24	1.67	0.68	10.38	1.40	0.38	0.12	0.59	1.60	12.47	39	21.17	4.95

ками Берингова моря и северо-западной части Тихого океана осадки Курильской котловины обогащены марганцем (среднее 1.29 %), литием (29.2 мг/кг), цезием (3.63 мг/кг), торием (4.05 мг/кг), свинцом (18.63 мг/кг) и рубидием (53.86 мг/кг).

Суммарная концентрация РЗЭ в осадках составляет от 30.08 (ст. LV55-9) до 89.58 мг/кг (ст. LV55-48), среднее — 68.98 мг/кг. Концентрация иттрия варьирует от 9.34 (ст. LV71-5) до 18.65 мг/кг (ст. LV71-7), среднее — 12.49 мг/кг. Следует отметить, что общая концентрация лантаноидов находится в пределах 30.08—89.58 мг/кг (табл. 3). Характерны незначительные положительные европиевая и цериевая аномалии. Анализ спектров распределения РЗЭ в донных отложениях Курильской котловины позволил условно выделить две группы: первая включает станции, на которых донные осадки характеризуются довольно однородным распределением с незначительным преобладанием легких РЗЭ. Вторая группа включает станции, тренд распределения РЗЭ которых имеет противоположную картину — отмечается преобладание тяжелых РЗЭ (рис. 2, а, б).

Северо-западная часть Тихого океана. По гранулометрическому составу осадки со станций, расположенных на абиссальной равнине Тихого океана, прилегающей к Курило-Камчатскому желобу, представлены пелит-алевритовыми и алеврит-пелитовыми илами светло- и темно-коричневого цвета. Илы полужидкие, вязкие и пластичные [Sattarova, Artemova, 2015]. Станции, расположенные вдоль Камчатки, представлены терригенными и терригенно-диатомовыми осадками серо-зеленого цвета с песчанисто-алевритовой и миктитовой структурами. Отложения возвышенностей Обручева и Детройт — терригенные мектит-алевритовые, светло-коричневые с незначительным количеством диатомовых и карбонатов.

Осадки северо-западной части Тихого океана отличаются максимальными средними содержаниями алюминия (6.12 %), железа (3.62 %), кальция (2.88 %), магния (1.44 %), скандия (15.34 мг/кг), стронция (277 мг/кг) и циркония (79.6 мг/кг). Содержание органического углерода варьирует в пределах 0.44 до 1.55 %, среднее — 0.97 %; кремния в осадках — 21.95—31.84 %, среднее 28.02 % (см. табл. 2).

Суммарное содержание РЗЭ в осадках изменяется от 40.3 на ст. LV55-4 до 105.4 мг/кг на ст. 9(D1) (см. табл. 3), со средним значением 70.90 мг/кг. Концентрация иттрия — от 12.57 (ст. LV55-4) до 24.50 мг/кг (ст.7(C1)), среднее — 17.06 мг/кг. При нормировке на состав NASC редкие земли в поверхностных осадках имеют сходное распределение (рис. 2, в-д) и с заметным во всех случаях преобладанием группы ТРЗЭ над легкими (параметр LREE/HREE составляет от 0.43 до 0.93) (см. табл. 3). В осадках некоторых станций отмечается проявление положительной европиевой ($E_{an} = 0.95—1.32$) аномалии. Величина цериевой аномалии находится в диапазоне значений 0.80—1.15.

Берингово море. Донные отложения Берингова моря серо-зеленого до темно-серого цвета мягкие. По

Таблица 3. Содержание РЗЭ в донных отложениях Северо-Западной Пацифики, мг/кг

Станция	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	∑РЗЭ	Y	Eu _{an}	Ce _{an}	LREE/HREE
Курильская котловина Охотского моря																			
LV71-1	15.99	37.01	3.68	14.23	2.99	0.64	2.52	0.38	2.10	0.42	1.30	0.18	1.17	0.17	82.80	12.49	1.03	1.09	1.26
LV71-2	16.12	38.16	3.92	14.67	3.09	0.63	2.57	0.42	2.28	0.47	1.38	0.18	1.33	0.20	85.43	12.73	0.98	1.10	1.21
LV71-3	14.06	33.76	3.39	13.13	2.80	0.62	2.49	0.41	2.47	0.47	1.46	0.20	1.33	0.20	76.78	13.16	1.04	1.10	1.02
LV71-4	11.64	27.80	2.85	11.45	2.62	0.62	2.48	0.42	2.55	0.53	1.59	0.23	1.53	0.22	66.52	14.60	1.07	1.07	0.77
LV71-5	7.31	19.66	1.86	7.59	1.71	0.45	1.66	0.27	1.57	0.33	0.98	0.14	0.92	0.14	44.59	9.34	1.17	1.18	0.81
LV71-6	9.28	22.19	2.21	9.10	2.09	0.52	2.04	0.31	1.87	0.39	1.16	0.17	1.11	0.16	52.61	10.84	1.12	1.07	0.82
LV71-7	7.96	19.71	2.21	9.86	2.64	0.74	2.72	0.50	3.01	0.65	1.96	0.28	1.88	0.29	54.41	18.65	1.21	0.99	0.47
LV71-11	16.63	37.06	3.75	13.60	2.87	0.54	2.15	0.36	2.07	0.39	1.15	0.17	1.15	0.16	82.04	12.26	0.94	1.09	1.37
LV55-9	4.81	11.09	1.30	5.61	1.41	0.34	1.26	0.24	1.51	0.33	0.96	0.14	0.93	0.14	30.08	10.09	1.13	0.95	0.56
LV55-41	13.29	34.21	3.05	11.74	2.50	0.51	1.93	0.32	1.77	0.36	1.05	0.14	1.08	0.14	72.10	10.77	1.02	1.22	1.25
LV55-42	15.78	37.34	3.64	13.91	2.86	0.59	2.25	0.39	2.17	0.44	1.29	0.18	1.21	0.18	82.24	12.93	1.02	1.12	1.21
LV55-45	15.93	34.05	3.61	13.56	2.68	0.55	2.22	0.35	1.87	0.37	1.09	0.16	1.03	0.14	77.61	11.33	0.99	1.03	1.45
LV55-48	18.06	39.84	4.09	15.42	3.24	0.62	2.54	0.38	2.11	0.42	1.30	0.17	1.21	0.17	89.58	13.13	0.94	1.06	1.41
Среднее	12.84	30.14	3.04	11.84	2.58	0.57	2.22	0.36	2.10	0.43	1.28	0.18	1.22	0.18	68.98	12.49	1.05	1.08	1.05
Стд. откл.	4.24	9.13	0.89	2.99	0.54	0.10	0.41	0.07	0.41	0.09	0.28	0.04	0.26	0.04	18.19	2.35	0.08	0.07	0.33
Северо-западная часть Тихого океана																			
LV55-4	6.10	14.30	1.76	7.64	1.89	0.46	1.97	0.34	2.14	0.45	1.39	0.21	1.43	0.22	40.30	12.57	1.04	0.93	0.50
LV71-9	5.89	14.00	1.71	7.87	2.09	0.64	2.24	0.40	2.49	0.54	1.61	0.25	1.66	0.23	41.61	16.70	1.30	0.91	0.43
LV71-10	6.67	15.61	1.83	7.56	1.94	0.58	2.16	0.33	2.00	0.45	1.33	0.19	1.23	0.20	42.10	13.59	1.23	0.98	0.56
1(A1)	14.40	37.10	4.02	16.80	3.85	0.89	4.08	0.60	3.46	0.68	2.17	0.31	2.16	0.33	90.85	16.80	0.98	1.06	0.75
2(A2)	14.00	34.90	3.95	16.30	3.81	0.99	4.18	0.62	3.69	0.89	2.32	0.34	2.40	0.35	88.73	17.90	1.08	1.03	0.68
3(A3)	9.43	22.60	2.85	11.80	2.77	0.74	3.01	0.50	2.86	0.63	1.85	0.27	1.81	0.28	61.40	14.70	1.12	0.95	0.61
4(B1)	10.20	23.90	3.03	12.90	3.07	0.89	3.60	0.57	3.45	0.75	2.22	0.33	2.19	0.33	67.43	17.30	1.16	0.92	0.54
5(B2)	14.10	35.50	3.99	16.00	3.78	0.90	3.98	0.62	3.63	0.77	2.28	0.34	2.36	0.35	88.60	18.20	1.02	1.05	0.68
6(C2)	15.80	39.60	4.31	17.40	4.18	0.97	4.58	0.71	4.21	0.88	2.61	0.39	2.71	0.41	98.77	21.30	0.97	1.06	0.64
7(C1)	13.50	33.50	3.79	16.50	3.88	0.92	4.35	0.67	4.37	0.94	2.85	0.44	3.17	0.49	89.37	24.50	0.98	1.00	0.50
8(D3)	13.30	32.50	3.78	15.40	3.70	0.92	4.10	0.67	4.10	0.89	2.77	0.42	2.84	0.45	85.83	22.30	1.03	1.01	0.53
9(D1)	18.30	45.90	4.83	18.00	4.01	0.95	4.00	0.60	3.38	0.68	2.17	0.30	2.01	0.31	105.4	15.70	1.04	1.13	0.93
11(E1)	15.10	38.00	3.85	14.80	3.26	0.74	3.50	0.51	2.96	0.59	1.84	0.27	1.83	0.28	87.52	14.30	0.95	1.13	0.85
12(E2)	15.00	38.50	3.81	14.80	3.25	0.76	3.46	0.50	3.00	0.60	1.86	0.27	1.83	0.27	87.90	14.10	0.99	1.15	0.84
LV63-3	7.73	17.80	2.53	11.23	2.88	0.90	3.12	0.54	3.29	0.70	2.37	0.30	2.09	0.33	55.81	19.25	1.32	0.84	0.46
LV63-4	10.82	21.01	3.28	12.70	2.98	0.78	3.10	0.51	2.96	0.63	1.76	0.26	1.72	0.26	62.75	15.90	1.12	0.80	0.73
LV63-5	10.29	21.77	3.07	12.68	3.11	0.86	3.11	0.50	3.14	0.65	1.98	0.28	1.88	0.28	63.62	17.71	1.22	0.85	0.63
LV63-8	11.21	24.85	3.24	13.66	3.14	0.87	3.13	0.53	3.19	0.65	1.96	0.28	1.83	0.28	68.83	17.73	1.22	0.89	0.68
LV63-33	8.66	19.32	2.64	11.43	2.84	0.83	2.79	0.47	2.84	0.58	1.74	0.26	1.70	0.25	56.36	16.16	1.29	0.86	0.61
LV63-40	8.39	18.99	2.51	10.32	2.55	0.69	2.52	0.42	2.52	0.53	1.59	0.22	1.53	0.23	53.01	14.27	1.19	0.91	0.64
LV63-44	7.68	17.32	2.42	10.59	2.64	0.82	2.89	0.48	2.98	0.62	1.89	0.27	1.80	0.27	52.68	17.28	1.29	0.85	0.53
Среднее	11.27	27.00	3.20	13.16	3.12	0.81	3.33	0.53	3.17	0.67	2.03	0.30	2.01	0.31	70.90	17.06	1.12	0.97	0.63
Стд. откл.	3.58	9.84	0.88	3.22	0.68	0.14	0.75	0.10	0.62	0.14	0.41	0.07	0.48	0.07	20.09	2.96	0.12	0.11	0.13
Берингово море																			
LV63-9	7.71	16.98	2.24	9.18	2.11	0.59	2.04	0.34	1.94	0.39	1.20	0.18	1.22	0.18	46.29	10.85	1.24	0.90	0.74
LV63-12	13.10	27.85	3.45	13.16	2.83	0.68	2.61	0.42	2.42	0.49	1.47	0.22	1.48	0.23	70.41	13.40	1.11	0.94	0.92
LV63-15	15.13	31.28	3.88	14.77	3.20	0.85	2.82	0.44	2.70	0.50	1.51	0.21	1.36	0.21	78.84	13.91	1.23	0.93	1.10
LV63-20	19.71	39.96	4.89	18.57	3.69	0.89	3.43	0.50	2.61	0.50	1.53	0.21	1.35	0.21	98.06	14.15	1.10	0.93	1.39
LV63-23	18.93	38.41	4.73	17.53	3.57	0.79	3.03	0.46	2.54	0.48	1.45	0.19	1.27	0.19	93.58	13.23	1.06	0.94	1.43
Среднее	14.92	30.89	3.84	14.64	3.08	0.76	2.79	0.43	2.44	0.47	1.43	0.20	1.34	0.20	77.44	13.10	1.15	0.93	1.12
Стд. откл.	4.86	9.24	1.08	3.73	0.64	0.12	0.51	0.06	0.30	0.05	0.14	0.02	0.10	0.02	20.66	1.32	0.08	0.02	0.30

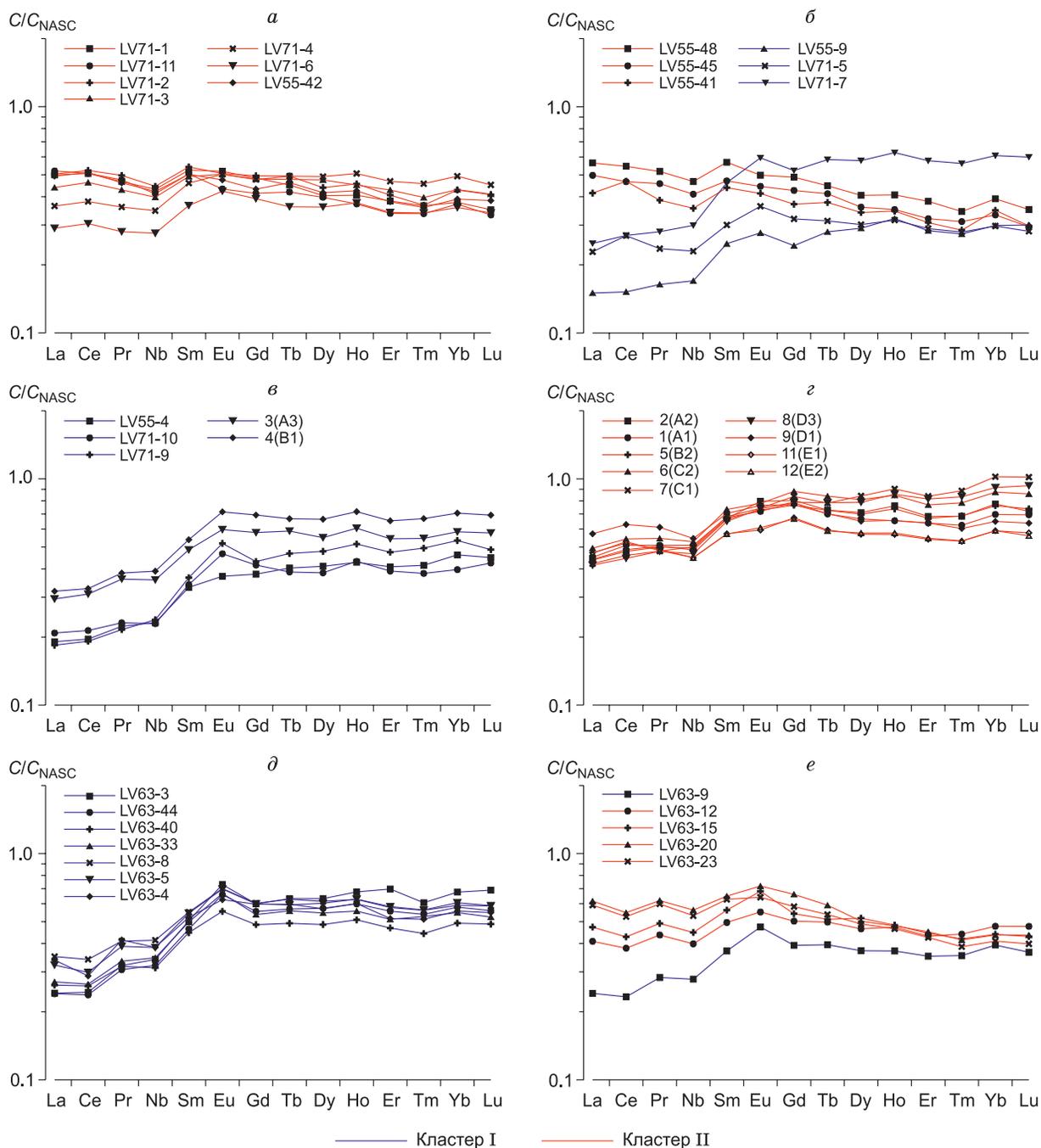


Рис. 2. Графики распределения редкоземельных элементов:

a, б — в донных отложениях Курильской котловины Охотского моря; *в–д* — в донных отложениях северо-западной части Тихого океана; *е* — в донных отложениях Берингова моря. Для нормирования использован состав северо-американского сланца (NASC) [Gromet et al., 1984].

гранулометрическому составу осадки относятся к алевроитопелитам, исключение составляет проба со станции LV63-15, имеющая песчанистую структуру. Исследуемые отложения относятся к терригенным с незначительным содержанием диатомей и их обломков, спикул губок.

Осадки данного района отличаются максимальными средними концентрациями органического углерода (1.54 %), кремния (30.91 %), титана (0.31 %), калия (1.48 %), ниобия (5.22 мг/кг), хрома (74.06 мг/кг) и цинка (100.4 мг/кг).

Суммарное содержание РЗЭ в исследованных пробах варьирует от 46.29 (ст. LV63-9) до 98.06 мг/кг (ст. LV63-20), среднее составляет 77.44 мг/кг. Концентрация иттрия — от 10.85 до 14.15 мг/кг, сред-

нее — 13.10 мг/кг. Рассматривая спектр распределения РЗЭ в донных осадках Берингова моря, можно отметить, что в целом он характеризуется пологим обликом с незначительным подъемом в области средних и тяжелых РЗЭ (рис. 2, е). Эти спектры в определенной мере сходны со спектрами РЗЭ в осадках северо-западной части Тихого океана, но имеют более выраженную положительную европиевую аномалию. Состав РЗЭ почти на всех станциях имеет незначительный дефицит церия ($C_{e_{an}} = 0.90—0.94$). Отмечаются три станции (LV63-15, LV63-20, LV63-23), где обращает на себя внимание характер спектров распределения РЗЭ в осадках. Здесь наблюдается незначительное увеличение легких РЗЭ (параметр LREE/HREE > 1).

ОБСУЖДЕНИЕ

Гранулометрический состав является одним из основных факторов, контролирующих фракционирование редких земель в осадках [Zhang et al., 2012]. С увеличением доли тонких фракций в осадках растет общее содержание РЗЭ (см. рис. 1, б; табл. 3). При рассмотрении распределения РЗЭ можно отметить, что осадки, содержащие более крупные фракции имеют в своем составе отрицательную аномалию церия, которая в тонких фракциях переходит в положительную (см. рис. 2). Как отмечают авторы работы [Tlig, Steinberg, 1982], крупные фракции, представленные в основном аморфным кремнеземом, имеют дефицит церия и легких РЗЭ. Согласно А.В. Дубину [2006], глинистый материал пелагических осадков, терригенные осадки океанов и морей часто обогащены легкими РЗЭ при отсутствии аномального поведения церия. На рис. 3 показаны особенности фракционирования РЗЭ в осадках Северо-Западной Пацифики. Здесь наблюдаются корреляции LREE/HREE с геохимическими, биогенными и литологическими показателями. Влияние питающих провинций прослеживается в отрицательной зависимости с показателем Zr/Rb, являющимся индикатором содержания тяжелых минералов и положительной зависимости с Nb/Y (показателем кислой пирокластике). При анализе микроскопических препаратов установлено присутствие вулканического стекла. Эксплозивные извержения в голоцене—позднем плейстоцене являются вторым значимым источником поступления обломочного вещества в донные осадки Северо-Западной Пацифики после речного стока, абразии и ледового разноса [Дергачев, Николаева, 2010].

При рассмотрении поведения РЗЭ в различных гранулометрических типах отложений с учетом органического вещества ($C_{орг}$) в целом прослеживается зависимость увеличения значений параметра LREE/HREE совместно с увеличением в осадках содержаний $C_{орг}$ и тонкодисперсного материала. Обогащение легкими РЗЭ может объясняться следствием дополнительной сорбции легких РЗЭ. В остальных пробах, по гранулометрическому составу близких к алевроиту, эта корреляция практически пропадает. Возможно, причиной является влияние питающих провинций и литодинамическая обстановка региона. Вследствие этого была проведена геохимическая типизация донных отложений на основе кластерного анализа.

По результатам кластерного анализа выделяются две группы станций (рис. 4). Группировка проводилась по графику последовательного объединения. Станции, объединенные в кластер I, расположены на склонах или подводных возвышенностях вдоль Курильских островов, Камчатки и Командорских островов (см. рис. 4). Только станция LV71-5 удалена и находится на северо-восточном склоне Курильской котловины. Остальные станции сгруппировались в кластер II. Отличительной особенностью кластеров является различие в концентрации некоторых элементов. Наблюдается синхронное увеличение Mn, Nb, Cs, Th, U, Pb, Rb вместе с увеличением легких редкоземельных элементов (табл. 4). В то же время средние значения тяжелых РЗЭ остаются равными между кластерами. По содержанию органического углерода выделенные кластеры мало различимы. Средние содержания $C_{орг}$ в кластерах I и II составили 1.1 и 1.3 % соответственно. Пробы, отнесенные к кластеру I, содержат больше песчанистой фракции, чем пробы кластера II. В то же время содержание алевроитовой фракции (0.004—0.063 мм) в двух группах почти совпадает (около 60 %). Кластер II характеризуется увеличением содержания пелитовой фракции.

Пробы, входящие в кластер I, имеют отношение LREE/HREE менее 1, которое колеблется от 0.43 до 0.81. Спектры РЗЭ кластера I практически повторяют спектры вулканических пород Курильских островов и Камчатского полуострова [Hochstaedter et al., 1996; Мартынов и др., 2010]. То же самое относится и к подводной возвышенности Геофизиков [Baranov et al., 2002], что говорит о влиянии эдафогенного материала на состав РЗЭ в донных отложениях рассматриваемого кластера. Также совпадение спектров РЗЭ наблюдается со взвесью р. Кислая на о. Кунашир [Чудаева, Чудаев, 2011] и приближенно повторяет спектры РЗЭ речных отложений о. Хоккайдо [Ohta et al., 2007]. В целом химический состав донных отложений Курило-Камчатской дуги близок к вулканическим породам питающих провинций [Астахов, 2001].

Кластер II отличается различным спектром РЗЭ, отмечаются пробы с отношением LREE/HREE как менее 1, так и более (см. рис. 2). Спектры лантаноидов в кластере II также сопоставимы с питающими провинциями. Терригенный материал поступает в Берингово море, главным образом со стоком боль-

ших рек — Анадырь, Юкона и Кукоквима, дренирующих две трети общей площади водосборного бассейна моря. Второстепенное значение имеет твердый сток малых рек, а также абразия берегов [Лисицын, 1966]. Осадки северо-западной части Берингова моря, включая и станции на хр. Ширшова, по нормированному распределению лантаноидов близки к осадкам Анадырского залива [Аникиев и др.,

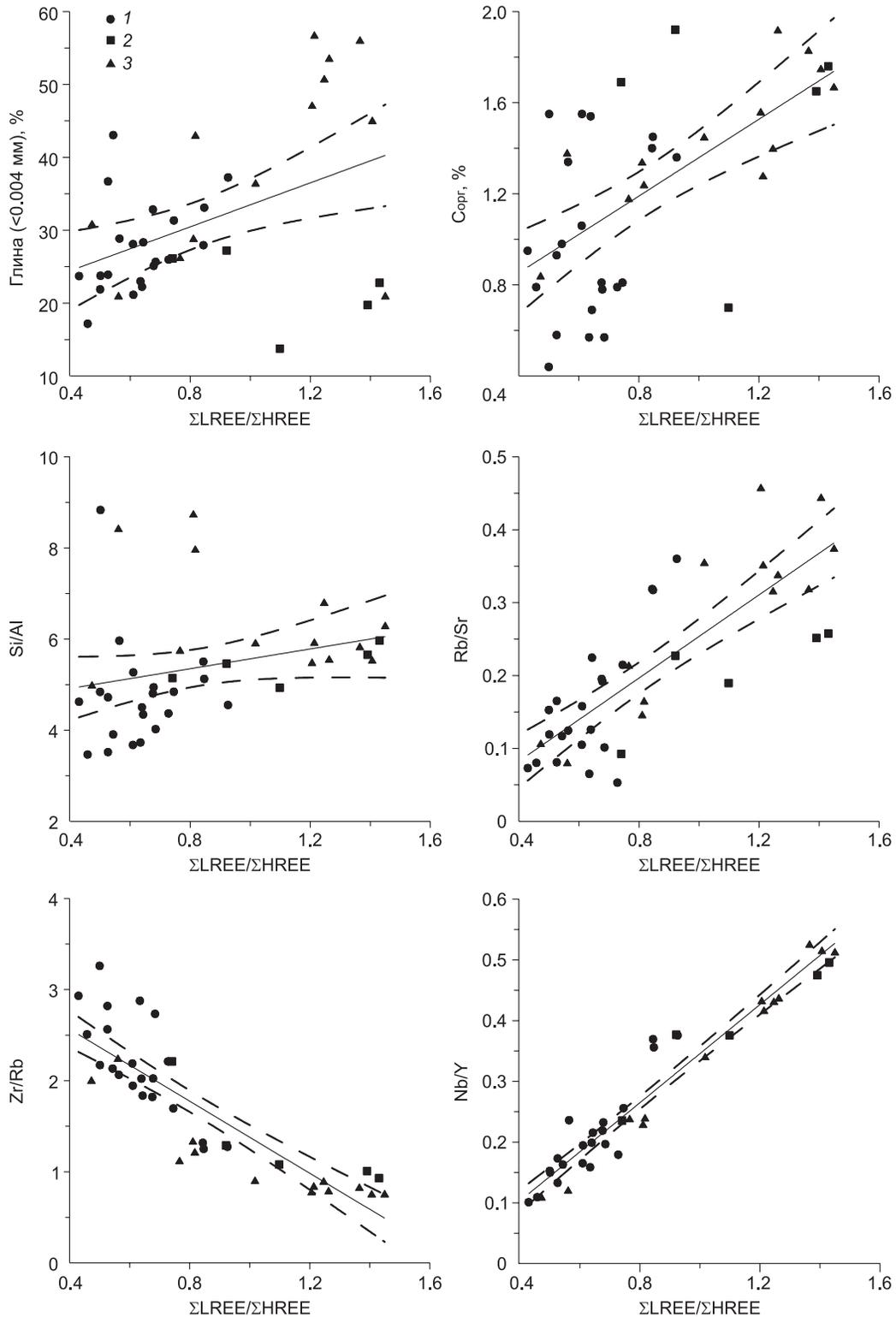


Рис. 3. Соотношение $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ с глинистой фракцией, $C_{\text{орг}}$, Si/Al , Rb/Sr , Zr/Rb , Nb/Y в донных отложениях Северо-Западной Пацифики.

1 — Тихий океан, 2 — Берингово море, 3 — Охотское море. Тонкая линия — линия регрессии (тренд), штриховая — 95%-й доверительный интервал для линии регрессии.

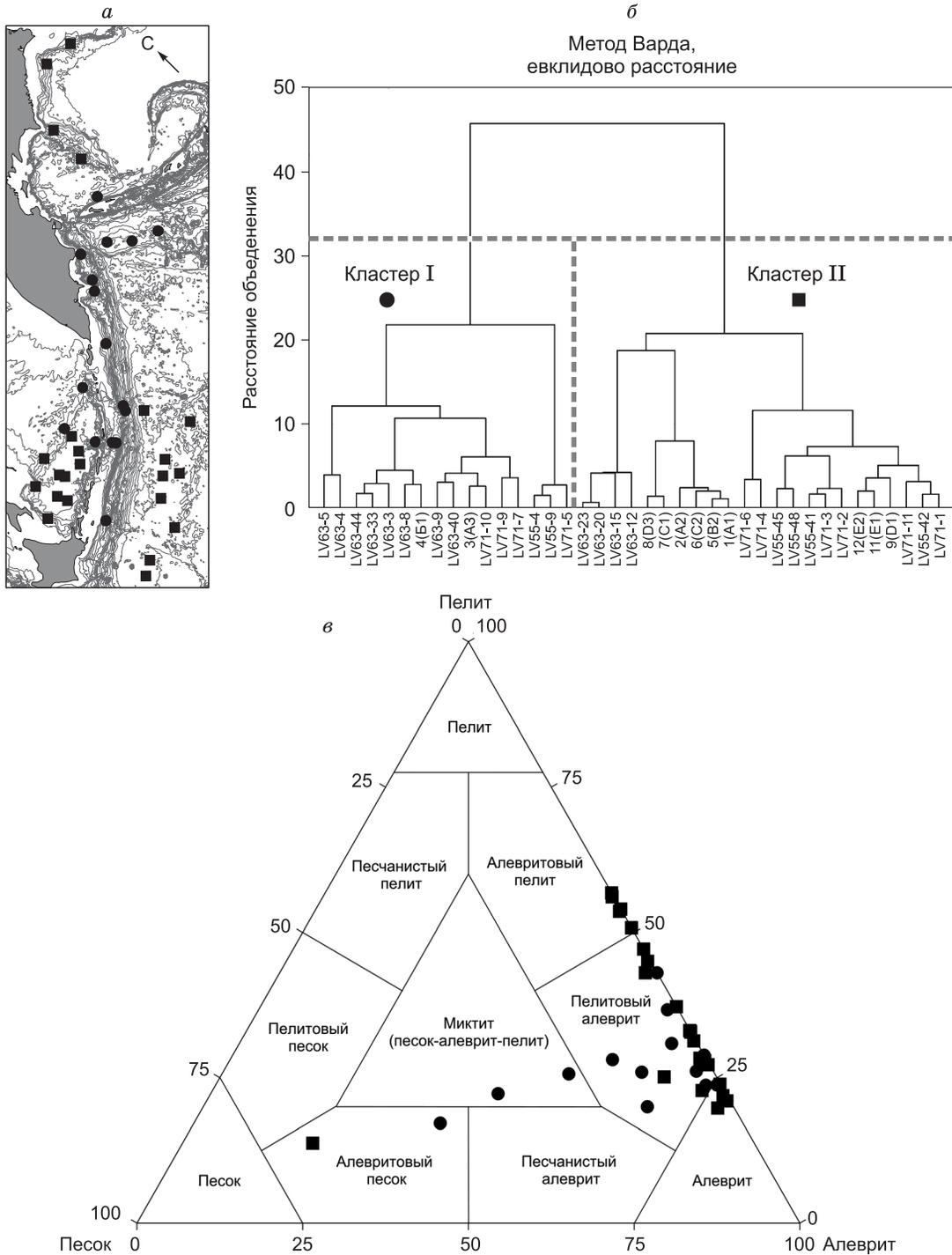


Рис. 4. Результаты статистической обработки данных:

а — карта расположения станций (кружки соответствуют кластеру I, квадратики — кластеру II); *б* — дендрограмма кластерного анализа; *в* — классификационный треугольник литологических типов.

1997], здесь осадконакопление происходит в основном под влиянием выносов р. Анадырь, которые переносятся западной ветвью крупного циклонического круговорота поверхностных вод и в результате ледового разноса. В то же время состав РЗЭ в осадках Курильской котловины сопоставим с осадками северо-западной части Охотского моря [Саттарова и др., 2014] и отложениями р. Амур [Сорокина, Зарубина, 2011]. Вследствие этого не следует исключать, что терригенный материал из р. Амур может достигать глубоководных частей Охотского моря путем как перемещения взвеси вдоль восточного побережья о. Сахалин, так и дрейфующими льдами [Zou et al., 2015]. На содержание РЗЭ в донных осадках

Таблица 4.

Сравнение средних значений концентраций химических элементов в выделенных кластерах (единицы соответствуют табл. 2 и табл. 3)

	Si	Al	Fe	Mn	Ca	Ti	Mg	K	Li	Nb	Cs	Cr	Hf	Th	U	Sc	Pb	Rb	Sr	Zn	Zr	P3Э	Y
Кластер I																							
Среднее	28	5.9	3.7	0.24	3.5	0.31	1.52	1.06	18	2.47	1.82	42	1.72	1.87	0.96	16	11	28	295	86	63	53	15
Стд. откл.	2	1.5	1.0	0.4	2.5	0.09	0.33	0.21	5	0.59	0.39	22	0.49	0.49	0.23	5	3	6	100	13	15	11	3
Кластер II																							
Среднее	29	5.4	3.1	0.84	1.3	0.25	1.23	1.42	29	5.00	4.06	43	2.28	4.23	1.45	12	20	58	215	98	71	84	15
Стд. откл.	2	0.8	0.3	1.1	0.5	0.04	0.17	0.20	7	1.10	0.93	19	1.13	1.60	0.24	2	7	13	31	19	22	12	4
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Eu/Eu*	Ce/Ce*	(LnL/LnH) _N						
Кластер I																							
Среднее	8.18	18.68	2.40	10.16	2.49	0.70	2.58	0.43	2.62	0.55	1.68	0.24	1.61	0.24	1.20	0.92	0.59						
Стд. откл.	1.85	3.76	0.60	2.38	0.55	0.17	0.64	0.10	0.62	0.13	0.41	0.06	0.38	0.06	0.08	0.09	0.11						
Кластер II																							
Среднее	15.09	35.41	3.80	14.82	3.25	0.74	3.10	0.48	2.80	0.57	1.72	0.25	1.69	0.25	1.03	1.06	1.00						
Стд. откл.	2.37	4.94	0.60	2.26	0.55	0.16	0.85	0.12	0.79	0.19	0.55	0.09	0.63	0.10	0.07	0.07	0.31						

пелагиали Тихого океана влияет атмосферный разнос, преимущественно перенос пыли из восточно-азиатских пустынь и вулканические извержения «тихоокеанского огненного кольца» [Ziegler et al., 2007]. В абиссальной части Тихого океана обогащение илов аморфным кремнеземом связано с присутствием значительного количества организмов с опаловым скелетом (диатомовые водоросли, в меньшей степени глубоководные губки), что отражает высокую биопродуктивность поверхностных вод. Присутствие биогенного кремнезема в осадках приводит к существенному снижению содержаний P3Э [Palmer, 1985]. Согласно [Akagi et al., 2011], диатомовые являются важными носителями тяжелых P3Э.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В донных отложениях Северо-Западной Пацифики содержание P3Э находится в пределах от 30 до 106 мг/кг, иттрия — от 9.34 до 24.5 мг/кг, что значительно меньше, чем в глубоководных глинах центральной части Тихого океана.

Изменения в валовом содержании P3Э контролируется преимущественно легкими P3Э. Концентрация тяжелых лантаноидов испытывает малую изменчивость. Осадки, содержащие более крупные фракции, имеют в своем составе отрицательную аномалию церия, которая в тонких фракциях переходит в положительную.

Донные отложения, расположенные рядом с Курило-Камчатской дугой, несколько обеднены P3Э по сравнению с отложениями абиссальной равнины Тихого океана, Курильской котловины и северо-западной части Берингова моря. Содержание и фракционирование P3Э обусловлено влиянием питающих провинций и литодинамической (геодинамической и гидрологической) обстановкой региона, что выражается в положительной корреляции отношения LREE/HREE с гранулометрическим составом, значениями Rb/Sr, Nb/Y и отрицательной со значениями Zr/Rb.

По химическому составу изученные пробы разделяются на два кластера. Первый кластер относится к Курило-Камчатской провинции. Поставка обломочного и перераспределение материала контролируется рельефом и основными течениями региона. Вследствие этого минералы тяжелой фракции в меньшей степени попадают в глубоководные районы, где в основном накапливаются терригенные и биогенно-терригенные илы, которые обособляются в кластер II.

Авторы благодарят сотрудников лаборатории геохимии осадочных процессов ТОИ ДВО РАН, проф. Ангелику Брандт (Зенкенбергский музей, г. Франкфурт, Германия), к.б.н. М.В. Малютину (ННЦМБ ДВО РАН, Владивосток) и д.г.-м.н. С.А. Горбаренко (ТОИ ДВО РАН, Владивосток) за организацию экспедиций и предоставление фактического материала, а также сотрудников Аналитического центра ДВГИ ДВО РАН за выполненные анализы. Авторы признательны рецензентам за конструктивные замечания к рукописи.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект 16-04-01431 А), Национального фонда естественных наук Китая (U160641, 41420104005) и госбюджетной темы «Палеоокеанология окраинных морей востока России и примыкающих районов Тихого океана, особенности и этапность кайнозойского осадконакопления, магматизма и рудогенеза» (№ АААА-А17-117030110033-0).

ЛИТЕРАТУРА

- Аксентов К.И., Саттарова В.В.** Геохимия редкоземельных элементов в современных донных осадках Амурского залива (Японское море) // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (7), с. 1323—1331.
- Аникиев В.В., Дударев О.В., Колесов Г.М., Боцул А.И., Сапожников Д.Ю.** Распределение и седиментационные потоки химических элементов в системе взвесь–донные осадки для эстуария р. Анадырь–Берингово море // Геохимия, 1997, № 3, с. 320—330.
- Астахов А.С.** Литохимия осадков материковой окраины Востока Азии. Владивосток, Дальнаука, 2001, 240 с.
- Балашов Ю.А.** Геохимия редкоземельных элементов. М., Наука, 1976, 267 с.
- Батулин Г.Н., Юшина И.Г.** Редкоземельные элементы в фосфатно-железомарганцевых корках подводных гор Тихого океана // Литология и полезные ископаемые, 2007, № 2, с. 115—132.
- Безруков П.Л.** Донные отложения Курило-Камчатской впадины // Труды Института океанологии АН СССР. М., Изд-во АН СССР, 1955, т. 12, с. 97—129.
- Боцул А.И.** Лазерный измеритель размеров частиц «Analysette 22»: достоинства, недостатки и некоторые особенности использования при анализе донных осадков // Условия образования донных осадков и связанных с ними полезных ископаемых в окраинных морях. Владивосток, Дальнаука, 2002, с. 114—118.
- Васильев Б.И., Тарарин И.А., Говоров И.Н., Коновалов Ю.И.** Новые данные о геологическом строении Курило-Камчатского желоба // Тихоокеанская геология, 1986, № 3, с. 64—73.
- Волков И.И., Фомина Л.С.** Новые данные по геохимии редкоземельных элементов в осадках Тихого океана // Геохимия, 1973, № 11, с. 1603—1615.
- Гурвич Е.Г., Лукашин В.Н., Лисицын А.П., Куринов А.Д.** Редкоземельные элементы и иттрий // Геохимия элементов-гидролизатов / Ред. А.Б. Ронов. М., Наука, 1980, с. 71—116.
- Дергачев А.Н., Николаева Н.А.** Минералогические индикаторы обстановок приконтинентального осадкообразования западной части Тихого океана. Владивосток, Дальнаука, 2010, 321 с.
- Дубинин А.В.** Геохимия редкоземельных элементов в осадках и конкрециях Гватемальской котловины Тихого океана: влияние процессов раннего диагенеза // Геохимия, 1994, № 8/9, с. 1335—1345.
- Дубинин А.В.** Редкоземельные элементы в процессах раннего диагенеза осадков Тихого океана // Литология и полезные ископаемые, 1998, № 4, с. 762—772.
- Дубинин А.В.** Геохимия редкоземельных элементов в океане. М., Наука, 2006, 360 с.
- Дубинин А.В., Волков И.И.** Редкоземельные элементы в металлоносных осадках Восточно-Тихоокеанского поднятия // Геохимия, 1986, № 5, с. 645—662.
- Дубинин А.В., Свальнов В.Н.** Эволюция осадконакопления по данным изучения аутигенных и биогенных фаз в пелагических осадках Южной котловины Тихого океана // Геохимия, 2001, № 4, с. 404—421.
- Дубинин А.В., Свальнов В.Н.** Геохимия марганцеворудного процесса в океане по данным изучения редкоземельных элементов // Литология и полезные ископаемые, 2003, № 2, с. 115—125.
- Дубинин А.В., Свальнов В.Н., Бережная Е.Д., Римская-Корсакова М.Н., Демидова Т.П.** Геохимия редких и рассеянных элементов в осадках и марганцевых микроконкрециях Ангольской котловины // Литология и полезные ископаемые, 2013, № 3, с. 191—214.
- Лисицын А.П.** Процессы современного осадконакопления в Беринговом море. М., Наука, 1966, 569 с.
- Мазарович А.О.** Окраинные моря — терминологический кризис // Геотектоника, 2011, № 4, с. 60—78.
- Мартынов Ю.А., Ханчук А.И., Кимура Д.-И., Рыбин А.В., Мартынов А.Ю.** Геохимия и петрогенезис четвертичных вулканитов Курильской островной дуги // Петрология, 2010, т. 18, № 5, с. 512—535.
- Родников А.Г., Забаринская Л.П., Пийп В.Б., Рашидов В.А., Сергеева Н.А., Филатова Н.И.** Геотраферс региона Охотского моря // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле, 2005, № 5, с. 45—58.
- Саттарова В.В., Зарубина Н.В., Блохин М.Г., Марьяш А.А.** Редкоземельные элементы в поверхностных осадках впадины Дерюгина Охотского моря // Тихоокеанская геология, 2014, т. 33, № 2, с. 109—117.
- Сорокина О.А., Зарубина Н.В.** Химический состав донных отложений среднего течения р. Амур // Тихоокеанская геология, 2011, т. 30, № 5, с. 105—113.
- Стрекопытов С.В., Дубинин А.В.** Редкоземельные элементы как индикаторы состава питающих провинций океана (на примере трансихоокеанского профиля) // Литология и полезные ископаемые, 1996, № 4, с. 438—444.
- Строение дна Охотского моря** / Под ред. В.В. Белоусова, Г.Б. Удинцева. М., Наука, 1981, 176 с.
- Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М.** Континентальная кора: ее состав и эволюция. М., Мир, 1988, 348 с.

Чудаева В.А., Чудаев О.В. Особенности накопления и фракционирования редкоземельных элементов в поверхностных водах Дальнего Востока в условиях природных и антропогенных аномалий // *Геохимия*, 2011, № 5, с. 523—549.

Удинцев Г.Б. Рельеф Курило-Камчатской впадины // *Труды Института океанологии АН СССР*. М., Изд-во АН СССР, 1955, т. 12, с. 97—129.

Akagi T., Fu F-fu., Hongo Y., Takahashi K. Composition of rare earth elements in settling particles collected in the highly productive North Pacific Ocean and Bering Sea: Implications for siliceous-matter dissolution kinetics and formation of two REE-enriched phases // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2011, v. 75, № 17, p. 4857—4876.

Bailey J.C. Geochemical history of sediments in the north western Pacific Ocean // *Geochem. J.*, 1993, v. 27, p. 71—90.

Baranov B.V., Werner R., Hoernle K.A., Tsoy I.B., Van Den Bogaard P., Tararin I.A. Evidence for compressionally induced high subsidence rates in the Kurile Basin (Okhotsk Sea) // *Tectonophysics*, 2002, v. 350, № 1, p. 63—97.

Dou Y.G., Yang S.Y., Liu Z.X., Clift P.D., Shi X.F., Yu H., Berne S. Provenance discrimination of siliciclastic sediments in the middle Okinawa Trough since 30 ka: constraints from rare earth element compositions. *Mar. Geol.*, 2010, v. 275, p. 212—220.

Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The «North American Shale Composite». Its compilation, major and trace element characteristics // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, v. 48, p. 2469—2482.

Henderson P. Rare earth element geochemistry. Oxford, Elsevier, 1984, 510 p.

Hochstaedter A.G., Kepezhinskas P., Defant M., Drummond M., Koloskov A. Insights into the volcanic arc mantle wedge from magnesian lavas from the Kamchatka arc // *J. Geophys. Res. Earth*, 1996, v. 101, № B1, p. 697—712.

Kato Y., Fujinaga K., Nakamura K., Takaya Y., Kitamura K., Ohta J., Toda R., Nakashima T., Iwamori H. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements // *Nat. Geosci.*, 2011, № 3, p. 535—539.

Li Y.-H. Interelement relationship in abyssal Pacific ferromanganese nodules and associated pelagic sediments // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1982, v. 46, № 6, p. 1053—1060.

Murray R.W., Buchhiltz ten Brink M.R., Brumsack H.J., Gerlach D.C., Price Russ G. Rare earth elements in Japan Sea sediments and diagenetic behavior of Ce/Ce*: Results from ODP Leg 127 // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, v. 55, p. 2453—2466.

Ohta A., Imai N., Terashima S., Tachibana Y. Elemental distribution of coastal sea and stream sediments in the island-arc region of Japan and mass transfer processes from terrestrial to marine environments // *Appl. Geochem.*, 2007, v. 22, № 12, p. 2872—2891.

Otosaka S., Noriki S. REEs and Mn/Al ratio of settling particles: horizontal transport of particulate material in the northern Japan Trench // *Mar. Chem.*, 2000, v. 72, p. 329—342.

Palmer M.R. Rare earth elements in foraminifera tests // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1985, v. 73, p. 285—298.

Rogachev K.A., Verkhunov A.V. Circulation and water mass structure in the southern Okhotsk Sea, as observed in summer 1994 // *Proceedings of the Workshop on the Okhotsk Sea and Adjacent Areas, PICES Scientific Report*, 1995, v. 6, p. 144—149.

Sattarova V.V., Artemova A.V. Geochemical and micropaleontological character of deep-sea sediments from the northwestern Pacific near the Kuril-Kamchatka Trench // *Deep Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, v. 111, p. 10—18.

Soyol-Erdene T.O., Huh Y. Rare earth element cycling in the pore waters of the Bering Sea Slope (IODP Exp. 323). *Chem. Geol.*, 2013, v. 358, p. 75—89.

Tlig S., Steinberg M. Distribution of rare-earth elements (REE) in size fractions of recent sediments of the Indian Ocean // *Chem. Geol.*, 1982, v. 37, p. 317—333.

Toyoda K., Nakamura Y., Masuda A. Rare earth elements of Pacific pelagic sediments // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1990, v. 54, p. 1093—1103.

Zhang X., Zhang F., Chen X., Zhang W., Deng H. REEs fractionation and sedimentary implication in surface sediments from eastern South China Sea // *J. Rare Earth*, 2012, v. 30, № 6, p. 614—620.

Ziegler C.L., Murray R.W., Hovan S.A., Rea D.K. Resolving eolian, volcanogenic, and authigenic components in pelagic sediment from the Pacific Ocean // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, v. 254, p. 416—432.

Zou J., Shi X., Zhu A., Chen M.-Te, Kao S., Wu Y., Selvaraj K., Scholz P., Bai Y., Wang K., Ge S. Evidence of sea ice-driven terrigenous detritus accumulation and deep ventilation changes in the southern Okhotsk Sea during the last 180 ka // *J. Asian Earth Sci.*, 2015, v. 114, p. 541—548.