

УДК 550.42:546.65:552.51:551.733(234.851)

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКИХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НИЖНЕПАЛЕОЗОЙСКИХ ПЕСЧАНИКОВ ПОЛЯРНОГО УРАЛА

*Н.Ю. Никулова<sup>1</sup>, И.В. Козырева<sup>1, 2</sup>*

<sup>1</sup> Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

<sup>2</sup> Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина

Поступила в редакцию 10.12.16

Все изученные разновидности песчаников нижнего палеозоя Полярного Урала формировались в мелководных морских условиях при отсутствии сероводородного заражения в окислительной обстановке. Степень дифференцированности спектров распределения РЗЭ отражает строение разрезов. Колебания содержания элементов-примесей указывают на поликомпонентный состав метапесчаников, а изменяющееся соотношение вулканомиктового и осадочного компонентов могло зависеть как от расстояния до статичных источников вулканомиктовых обломков, так и от интенсивности периодически возобновляющейся вулканической активности, а также вовлечения в область размыва новых территорий, в том числе древних континентальных блоков.

*Ключевые слова:* песчаник, редкие и редкоземельные элементы, условия осадконакопления, нижний палеозой, Полярный Урал.

*Nikulova N.Yu., Kozyreva I.V.* Specifics of rare and REE elements distribution and formation conditions of lower Paleozoic sandstones of Polar Urals. Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Series. 2017. Volume 92, part 1. P. 38–47.

All studied lower Paleozoic sandstone varieties had been formed in shallow marine environment without hydrosulfuric contamination in oxidizing conditions. The differentiation degree of the REE distribution spectra reflects the structure of the sections. Metasandstones of alluvial origin, containing products of redeposition of weathering crust, stand out by the predominance of heavy REE with absent europium anomaly. The minimal content of REE at about equilibrium ratio of light and heavy rare earth elements was found in marine monoquartz metasandstones from the upper parts of the studied sections. The intermediate values of REE content with a sharp europium maximum and the prevalence of heavy REE over light REE were observed in marine metasandstones overlying the basement rocks and Alkesvozh alluvial rocks. Tuff sandstones, composing some sections in the Vétvisty Brook and Malaya Usa River, are close to acidic volcanics by the REE composition and amount. The variation of impurity composition indicates the polycomponent composition of metasandstones, and varying ratio of volcanomictous and sedimentary components can depend on the distance from sources of volcanic debris and the intensity of periodical volcanic activity, as well as on the involvement of new areas including ancient continental blocks.

*Key words:* sandstones, rare and rare earth elements, sedimentation environment, lower Paleozoic, Polar Urals.

### Введение

На Полярном Урале обломочные породы основания палеозойского разреза, сформировавшиеся в различных палеогеографических и палеогеодинамических условиях, с угловым несогласием залегают на вулканогенных, вулканогенно-терригенных и метаосадочных породах фундамента. Базальные слои палеозоя представлены преимущественно псефитами, в которых песчаники слагают отдельные маломощные прослои, а на хр. Енганэпэ залегают в основании разреза и заключают субсогласное тело базальтоидов. В ряде разрезов в междуречье Мал. Кары и Мал. Усы нижнепалеозойские отложения представлены эффузивно-осадочной толщей. Проведенное нами ранее изучение литохимических осо-

бенностей песчаников основания палеозойского разреза позволило подтвердить их принадлежность к континентальным и морским осадочным и вулканогенно-осадочным разновидностям (Никулова, 2014, 2016). Целью данной публикации является выявление и сравнение особенностей поведения редких и редкоземельных элементов в песчаниках из различных по генетической принадлежности нижнепалеозойских терригенных толщ. Полученные нами новые данные по составу редких и редкоземельных элементов позволяют уточнить генетическую принадлежность, палеогеодинамические условия и с учетом достаточно хорошей изученности геохимии РЗЭ в распространенных в регионе магматических породах более точно определить источники обломочного материала.

**Объекты и методы исследования**

В работе изложены результаты изучения особенностей распределения редких и редкоземельных элементов в метаморфизованных в зеленосланцевой фации песчаниках из терригенных толщ, развитых в зоне межформационного контакта уралид/доуралид в пяти разрезах Полярного Урала (рис. 1).

В выборку вошли 33 образца песчаников, петрографический состав и литохимические особенности которых на основе данных по породообразующим оксидам были охарактеризованы нами в ряде публикаций (Никулова, 2016; Никулова, Козырева, 2016; Никулова и др., 2011; Никулова, Швецова, 2011). Определение содержания редких и редкоземельных элементов проведено в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН методом ICP-MS (Agilent7700х, аналитик канд. хим. наук Д.В. Кузьмин). Для интерпретации результатов анализов использованы индикаторные соотношения элементов (Тейлор, Мак-Леннан, 1988; Холодов, Недоумов, 1991; Bhatia, Crook, 1986; Condie, 1990; Cullers, 2000; Hatch, 1992; McLennon, 1989, 1993), традиционно применяющиеся при реконструкциях обстановок осадконакопления.

**Краткий очерк геологического строения района исследований**

На западном склоне Полярного Урала базальные горизонты уралид – отложения манитанырдской ( $E_3-O_1 mn$ ) серии, с угловым и азимутальным несогласием залегают на породах фундамента – вулканогенно-осадочных и вулканогенных породах бедамельской серии ( $RF_3-V_2 bd$ ), субвулканических и гипабиссальных телах риолитов и габбро-долеритов. В пределах хребтов Манитанырд и Енганэпэ бедамельская серия не расчленяется (Ефанова и др., 2009 г.). В ее составе выделяются две части: нижняя – сложенная основными вулканитами и их туфами, и верхняя – представленная вулканитами и туфами кислого состава. Образования бедамельской серии согласно перекрываются енганэпэйской ( $V_2-E_1 en$ ) свитой – переслаивающимися серыми и зеленовато-серыми туфоалевросланцами, мелко-средне-крупнозернистыми, местами грубозернистыми туфопесчаниками, туфогравелитами. Отложения манитанырдской серии, несогласно перекрывающие енганэпэйскую толщу, в этом районе также не подразделяются на свиты.

В разрезе, изученном на притоке р. Нияю на хр. Манитанырд (рис. 1, участок 1), на отложениях енганэпэйской свиты залегают песчано-алевролитосланцевая толща манитанырдской серии. Песчаники, имеющие бластопсаммитовую структуру и сланцеватую текстуру, состоят преимущественно из слабо- и среднеокатанных зерен кварца (80–95%), калиевого полевого шпата (5–10%) и кислого плагиоклаза (5–10%). Поровый цемент сложен микро-

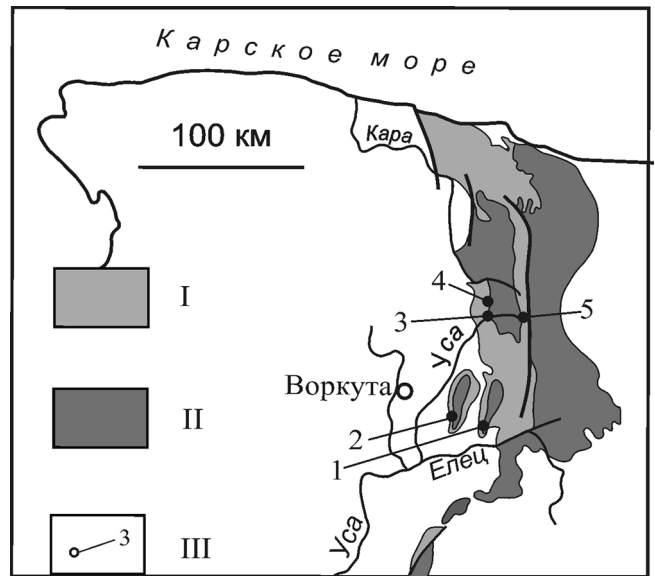
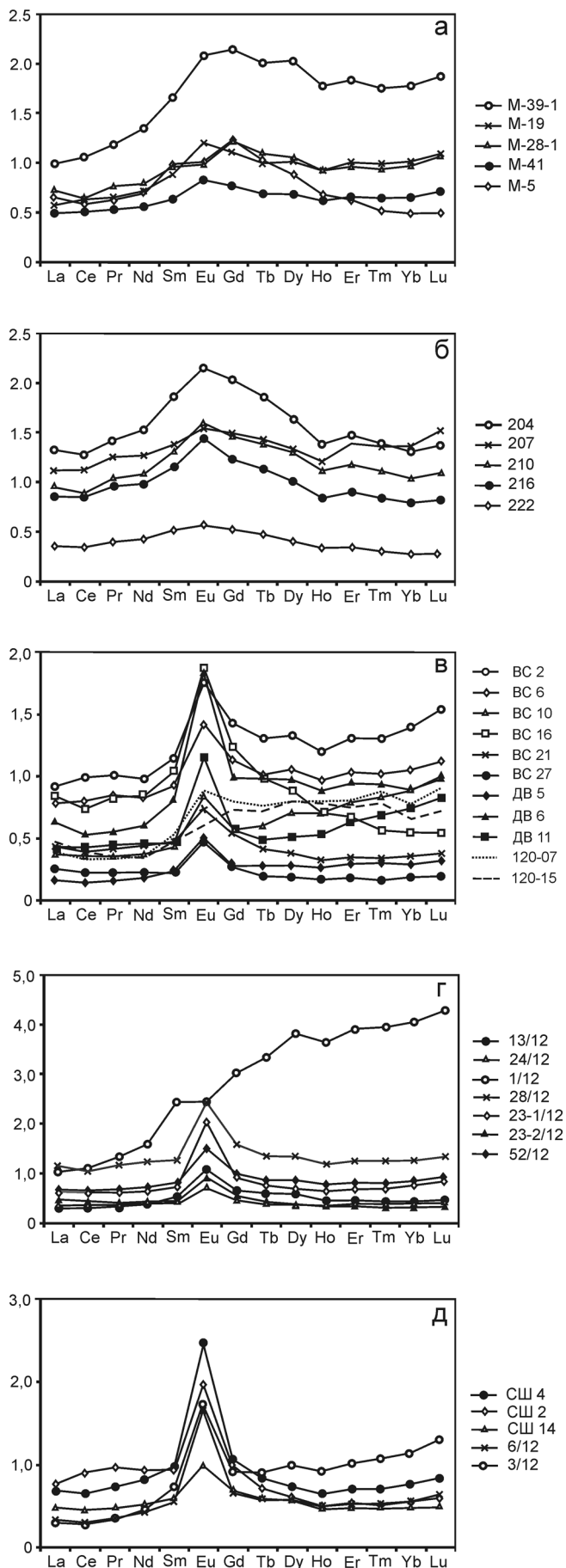


Рис. 1. Схема расположения нижнеордовикских и допалеозойских отложений на севере Урала, по (Клюжина, 1985): I – нижнепалеозойские отложения; II – доордовикские отложения; III – участки проведения исследований: 1 – хр. Манитанырд; 2 – хр. Енганэпэ; 3 – р. Мал. Уса; 4 – руч. Сауришор; 5 – руч. Ветвистый

зернистым серицит-кварцевым агрегатом или стильпномеланом. Особенностью песчаников является присутствие микроагрегатных зерен муассанита, состоящих из гексагональных кристаллов, сцементированных самородным кремнием (Никулова, Швецова, 2011).

В юго-западной части кряжа Енганэпэ, в правом борту руч. Изъя-Вож (рис. 1, участок 2), в толще мелкозернистых песчаников основания манитанырдской серии согласно залегают тела базальтоидов. Песчаники характеризуются бластопсаммитовой структурой и массивной или полосчатой, за счет обогащенных темноцветными минералами слоев, текстурой. Цемент порового типа, серицит-кварцевого состава, на отдельных участках – железистый, порового и пленочного типов. Обломочная часть представлена кварцем (~75%), калиевым полевым шпатом (~20%) и средним плагиоклазом (~5%). В песчаниках, залегающих непосредственно выше и ниже базальтового слоя, встречены единичные обломки базальта и вулканического стекла.

В верховье р. Малая Уса (рис. 1, участки 3–5) отложения хойдышорской свиты, являющиеся, согласно современной стратиграфической схеме (Стратиграфические схемы Урала, 1993), нижней частью манитанырдской серии, залегают на терригенно-вулканогенных образованиях верхнего рифея – эффузивно-песчано-туфо-сланцевой толще очетвисской ( $RF_3 o$ ) свиты и лядгейской ( $RF_3 ld$ ) свиты, представленной переслаиванием основных и кислых эффузивов и их туфов, прорванных субинтрузивными телами риолитов пайпудынского комплекса  $лл$  ( $E_3-O_1 pp$ ). На контакте фундамента и чехла фрагментарно присутствуют образования кембрийской метаморфизованной коры выветри-



вания (Козырева, Никулова, 2012; Никулова, 2014, 2016; Никулова, Козырева, 2016). Хойдышорская свита представляет собой преимущественно гравелитовую толщу, заключающую тела эффузивов контрастной базальт-риолитовой формации, геохимическая спецификация которых соответствует рифтогенным вулканитам, развитым на континентальной коре (Куликова и др., 2001). В.С. Озеровым с соавторами (2011) установлено присутствие в основании разреза континентальных аллювиально-пролювиальных отложений – аналога алькесвской ( $E_3-O_1 al$ ) свиты.

Согласно полученным ранее данным, песчаники хойдышорской свиты представлены тремя генетическими типами: континентальными аллювиальными, морскими осадочными и морскими вулканогенно-осадочными (Никулова, 2016). Морскими достаточно хорошо сортированными песчаниками сложен скальный выход в зоне межформационного контакта на правом берегу р. Мал. Уса (рис. 1, участок 3) и верхняя часть разреза в долине руч. Сауришор (рис. 1, участок 4). Песчаники характеризуются бластосаммитовой структурой с лепидогранобластовой структурой порового, базально-порового, реже – базального цемента. Обломочная часть представлена кварцем, полевыми шпатами, обломками пород (силицитов, глинистых сланцев) и тонкозернистой кварц-полевошпатовой породой. Аллювиальные песчаники залегают в основании разреза в долине руч. Сауришор (рис. 1, участок 3). В них обломочная часть примерно на 90% состоит из кварца, до 10 об. % приходится на полевые шпаты. Обломки пород встречаются редко и представлены кислыми и основными вулканитами. Поровый и базальный цемент сложен микрозернистым кварц-серицитовым агрегатом. Вулканомиктовые песчаники и туфопесчаники образуют слои в толще основных вулканитов в устье руч. Ветвистого (рис. 1, участок 5). Песчаники имеют бластосаммитовую структуру, массивную текстуру с лепидобластовой структурой порового серицит-хлоритового цемента и состоят из кварца и полевых шпатов. Кварцевые обломки часто имеют остроугольную форму, а полевые шпаты встречаются в виде таблитчатых зерен. Эпидот, составляющий 1–2 об. %, представлен обломочными зернами и скоплениями мелких зерен, развивающихся по кальциевым минералам.

### Результаты исследований

Содержания редких и редкоземельных элементов, их индикаторные соотношения, используемые при реконструкции состава материнских пород и условий формирования песчаников, приведены в табл. 1 и 2. Кривые распределения лантаноидов, нормированные на верхнюю континентальную кору, представлены на рис. 2.

Рис. 2. Нормированные на верхнюю континентальную кору, по (Тейлор, Мак-Леннан, 1988), спектры распределения содержания РЗЭ в песчаниках: а – хр. Манитаньрд; б – хр. Енганэпэ; в – р. Мал. Уса; г – руч. Сауришор, д – руч. Ветвистый

Таблица 1

Содержания редкоземельных элементов в метапесчаниках (мкг/г)

N п/п		N обр.	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	Манитаньяд	М 5	19,050	36,686	4,380	18,182	4,308	0,872	4,626	0,655	3,082	0,536	1,414	0,167	1,063	0,157
2		М 19	17,042	39,994	4,589	18,549	3,939	1,050	4,149	0,634	3,524	0,733	2,299	0,324	2,226	0,348
3		М 28-1	21,326	40,521	5,379	20,319	4,292	0,858	4,602	0,695	3,674	0,735	2,209	0,307	2,128	0,340
4		М 39-1	29,478	67,104	8,400	34,858	7,466	1,831	8,156	1,284	7,092	1,422	4,209	0,577	3,906	0,596
5		М 41-1	14,498	31,524	3,691	4,314	2,804	0,726	2,890	0,434	2,368	4,86	1,493	0,208	1,424	0,225
6	Енганэлэ	204	39,624	81,331	10,076	39,546	8,312	1,891	7,697	1,192	5,786	1,102	3,383	0,453	2,866	0,438
7		207	28,300	57,214	7,342	28,175	5,841	1,400	5,526	0,887	4,550	0,888	2,709	0,365	2,271	0,348
8		210	25,666	54,438	6,824	25,590	5,155	1,263	4,642	0,724	3,532	0,673	2,063	0,277	1,737	0,262
9		216	33,573	71,755	8,908	32,945	6,196	1,354	5,669	0,914	4,667	0,966	3,191	0,449	2,994	0,484
10		222	10,755	21,939	2,839	10,955	2,320	0,491	1,982	0,300	1,409	0,269	0,793	0,100	0,604	0,088
11	р. Малая Уса	СШ 2	22,793	58,415	6,901	24,408	4,224	1,739	3,813	0,464	2,144	0,407	1,239	0,171	1,226	0,195
12		СШ 4	20,748	42,388	5,288	21,409	4,402	2,160	4,089	0,536	2,624	0,522	1,632	0,235	1,713	0,268
13		СШ 14	14,774	29,790	3,453	13,736	2,704	0,873	2,647	0,380	2,012	0,384	1,114	0,158	1,067	0,159
14		3/12	9,444	19,122	2,534	11,571	3,290	1,511	3,496	0,584	3,488	0,748	2,343	0,354	2,516	0,416
15		6/12	10,330	20,042	2,612	11,257	2,489	1,470	2,554	0,380	2,028	0,400	1,253	0,174	1,257	0,205
16	руч. Сауришор	ВС 2	27,460	63,644	7,180	25,544	5,140	1,546	5,429	0,833	4,660	0,958	3,001	0,431	3,051	0,492
17		ВС 6	23,452	51,099	5,986	21,682	4,137	1,255	4,292	0,650	3,699	0,777	2,370	0,338	2,319	0,356
18		ВС 10	10,984	22,896	2,407	9,384	1,932	0,738	2,195	0,386	2,440	0,564	1,814	0,275	1,960	0,316
19		ВС 16	24,972	47,567	5,978	21,888	4,667	1,637	4,695	0,623	3,089	0,567	1,548	0,187	1,202	0,174
20		ВС 21	13,035	25,166	2,949	11,611	2,109	0,644	2,026	0,267	1,326	0,265	0,800	0,113	0,784	0,122
21		ВС 27	7,502	14,552	1,591	5,842	0,994	0,411	1,007	0,125	0,651	0,132	0,403	0,055	0,403	0,062
22		ДВ-5	18,705	33,970	4,000	15,830	3,602	1,608	3,723	0,632	3,399	0,702	2,168	0,310	1,973	0,312
23		ДВ-6	4,725	9,278	1,157	4,710	1,071	0,442	1,044	0,180	0,986	0,210	0,684	0,100	0,642	0,102
24		ДВ-11	12,800	27,343	3,193	11,897	2,057	1,019	2,168	0,313	1,810	4,26	1,460	0,227	1,635	0,264
25		120-07	11,7	21,3	2,4	9,16	2,4	0,78	3,02	0,49	2,78	0,63	1,73	0,26	1,44	0,23
26	120-15	14,0	24,8	2,51	9,0	2,14	0,53	2,78	0,46	2,77	0,64	1,86	0,29	1,71	0,29	
27	руч. Ветвистый	1/12	8,728	18,444	2,260	9,511	2,298	0,943	2,424	0,373	1,952	0,354	0,999	0,135	0,905	0,141
28		13/12	9,819	19,629	2,462	9,594	1,767	0,604	1,652	0,241	1,288	0,260	0,821	0,121	0,834	0,129
29		24/12	30,428	68,974	9,180	40,902	10,976	2,142	11,495	2,130	13,357	2,909	9,000	1,307	8,918	1,374
30		28/12	33,543	65,978	8,160	31,826	5,683	2,110	5,968	0,858	4,635	0,940	2,831	0,406	2,745	0,422
31		23-1/12	18,805	38,076	4,158	16,321	3,205	1,793	3,402	0,468	2,367	0,495	1,524	0,224	1,638	0,263
32		23-2/12	13,003	25,969	2,737	10,324	1,873	0,775	2,012	0,265	1,283	0,249	0,711	0,095	0,635	0,096
33		52/12	19,354	40,521	4,671	18,062	3,507	1,312	3,681	0,542	2,972	0,605	1,839	0,260	1,839	0,289

Таблица 2

## Содержание элементов-примесей в метапесчаниках (мкг/г)

№ п/п	Уча-сток	№ обр.	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	Rb	Sr	Y	Zr
1	Манитаньгд	М 5	4,79	0,494	4,64	22,96	214,81	4,50	20,41	48,38	25,79	3,10	3,35	17,42	20,78	15,35	42,23
2		М 19	18,94	1,524	15,11	86,70	103,08	10,56	25,96	25,74	50,05	13,26	9,44	67,26	33,63	19,36	190,97
3		М 28-1	12,47	0,648	9,41	55,72	92,86	6,64	15,58	31,28	46,68	6,63	8,71	33,19	120,95	20,01	249,88
4		М 39-1	64,96	2,581	26,12	148,91	109,14	22,29	49,36	67,10	99,16	23,49	11,08	131,17	34,33	37,56	220,41
5		М 41-1	11,00	0,460	6,04	40,16	127,63	4,12	11,65	27,98	20,78	5,08	7,50	24,51	15,46	13,33	186,14
6	Енганэлэ	204	96,30	5,582	36,60	241,39	170,56	27,58	78,63	22,94	175,23	37,04	13,80	194,89	32,82	41,28	250,48
7		207	121,21	4,111	31,26	160,07	135,53	62,77	78,22	17,24	121,39	28,14	7,87	166,60	45,21	33,68	224,05
8		210	109,52	3,240	27,10	141,93	134,28	42,60	73,48	23,87	94,94	24,88	10,01	133,70	31,20	25,71	187,78
9		216	75,48	2,211	20,94	149,47	228,22	9,58	27,08	4,13	59,35	18,84	14,60	107,17	23,39	38,14	881,27
10		222	17,50	0,363	3,94	19,87	130,86	0,99	7,41	6,00	7,30	4,01	6,65	19,89	9,90	11,37	51,10
11	р. Малая Уса	СШ 2	20,72	2,689	12,78	81,45	125,47	17,25	47,78	7,04	51,99	23,14	3,59	132,99	16,73	11,26	87,50
12		СШ 4	11,95	2,860	14,55	61,35	122,21	10,64	29,08	14,23	33,65	26,36	4,49	155,00	35,12	13,36	98,07
13		СШ- 4	14,77	1,332	6,99	46,03	190,98	8,14	16,74	30,22	26,05	11,76	3,50	33,12	54,17	10,36	87,33
14		3/12	66,27	2,161	29,52	145,56	203,89	10,26	24,34	0,00	46,12	20,64	13,89	44,73	135,40	19,81	296,51
15		6/12	27,98	1,049	8,24	29,31	51,52	6,05	11,17	0,00	14,40	12,52	6,77	82,84	28,30	10,53	65,77
16	руч. Сауригор	ВС 2	41,74	3,538	24,36	146,43	144,34	18,57	42,34	28,97	78,23	25,92	7,35	100,81	120,03	26,58	430,79
17		ВС 6	29,71	2,441	17,32	106,32	121,90	17,08	38,49	24,89	64,70	18,16	7,47	69,26	81,07	22,28	255,24
18		ВС 10	27,93	2,001	15,94	96,43	137,78	14,85	29,49	24,27	50,19	17,74	9,39	54,37	76,32	15,06	277,94
19		ВС 16	19,80	0,990	10,77	51,80	164,52	7,95	16,11	33,63	36,08	10,04	2,66	28,54	43,60	19,06	92,40
20		ВС 21	23,19	0,487	8,24	66,69	230,02	7,44	16,73	25,25	37,35	7,65	5,18	8,77	49,31	8,32	118,69
21		ВС 27	11,30	0,401	5,57	41,27	130,88	12,74	15,90	21,62	37,08	5,92	3,04	15,52	27,08	3,46	56,64
22		ДВ 6	15,65	0,386	14,73	68,46	186,04	10,48	19,10	9,41	31,08	10,57	5,97	13,11	52,46	8,33	82,33
23		ДВ 5	57,63	1,752	44,68	324,97	239,94	48,82	101,44	9,45	122,55	29,22	17,45	77,52	36,36	29,73	201,02
24		ДВ 11	87,08	2,759	15,75	94,28	197,27	4,99	15,36	0,00	32,32	22,66	13,64	51,18	117,19	10,01	239,06
25		120-7	н/о	н/о	10,20	н/о	85,10	20,80	40,00	н/о	0,00	н/о	н/о	8,12	55,00	н/о	21,00
26	120-15	н/о	н/о	15,50	н/о	92,80	8,28	320,00	н/о	20,00	н/о	н/о	14,40	125,00	н/о	60,00	
27	руч. Ветвистый	1/12	18,91	0,727	5,70	37,77	55,67	3,10	6,71	0,00	14,99	7,32	10,77	12,92	52,22	10,28	99,23
28		13/12	20,58	0,227	6,49	79,70	79,75	28,22	23,00	0,00	60,32	7,00	8,24	12,27	17,94	6,67	72,55
29		24/12	15,61	3,188	4,09	11,63	47,88	1,24	4,70	0,00	19,30	19,23	5,87	37,46	51,38	78,65	689,94
30		28/12	34,42	1,614	28,09	164,74	136,04	10,66	19,49	0,00	47,51	21,84	8,36	86,63	149,68	25,43	290,25
31		23-1/1	21,05	0,914	12,79	114,02	80,02	6,92	9,07	0,51	43,87	14,58	6,81	89,70	37,13	14,37	290,92
32		23-2/12	10,07	0,310	3,69	50,99	54,42	1,79	10,20	9,60	5,20	4,08	2,54	16,71	67,18	7,61	62,12
33		52/12	12,16	0,891	13,36	73,03	60,94	7,45	13,38	64,26	30,74	13,13	4,77	52,75	142,55	16,73	216,80

Таблица 2 (окончание)

Содержание элементов-примесей в метапесчаниках (мкг/г)

№ п/п	Уча-сток	№ обр,	Nb	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Cs	Ba	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U
1	Манитаньбурд	М-5	1,16	15,57	0,22	1,00	-1,876	0,71	0,08	0,77	102,80	1,12	0,010	3,96	0,11	2,05	0,14	1,77	0,611
2		М-19	3,92	2,09	0,64	4,34	-1,166	1,29	0,28	3,63	288,95	5,09	0,024	0,30	0,34	2,53	0,11	7,39	1,526
3		М-28-1	6,53	3,15	0,96	5,54	-1,360	0,86	0,46	2,36	186,28	6,53	0,303	1,10	0,16	7,71	0,13	6,62	1,278
4		М-39-1	13,82	0,38	0,82	5,28	-0,521	0,99	0,37	10,48	885,74	6,03	0,970	1,11	0,66	2,50	0,12	10,00	2,065
5		М-42-1	4,95	7,19	0,63	4,14	-2,154	0,36	0,23	1,28	283,76	4,69	0,385	2,24	0,10	3,58	0,09	5,19	1,041
6	Енганэлэ	204	49,77	0,33	0,82	5,06	2,941	0,60	0,39	17,83	523,36	4,41	3,276	0,99	0,43	1,80	0,06	5,62	1,653
7		207	15,19	0,67	0,70	4,49	2,303	0,41	0,37	16,25	463,91	3,91	0,518	0,79	0,34	3,88	0,10	4,85	1,013
8		210	12,81	2,08	0,59	3,89	1,720	0,36	0,29	11,77	436,24	3,18	0,391	0,82	0,27	12,12	0,16	4,08	0,917
9		216	27,47	1,73	2,57	16,83	2,630	0,49	1,29	8,26	271,36	13,69	1,006	1,40	0,21	3,94	0,07	9,04	1,898
10		222	1,41	9,02	0,17	1,02	0,169	-0,01	0,09	0,76	78,55	0,82	0,031	1,21	0,04	0,74	0,03	1,05	0,226
11	р. Малая Уса	СШ-2	4,16	4,00	0,33	1,49	0,742	1,56	0,14	5,51	1018,83	2,28	0,778	0,51	1,05	0,84	0,07	2,63	1,124
12		СШ-4	4,27	4,92	0,31	1,66	1,058	0,22	0,15	6,62	1155,34	2,56	0,231	0,78	1,20	1,40	0,05	3,00	1,579
13		СШ-14	2,00	12,05	0,78	1,69	0,457	-0,01	0,14	1,68	246,31	2,18	-0,013	1,58	0,26	1,91	0,02	2,47	1,358
14		3/12	8,84	0,69	0,74	6,57	1,131	3,05	0,37	2,76	1317,10	7,67	0,633	1,25	0,43	7,57	0,12	7,03	4,664
15		6/12	2,28	1,63	-0,03	1,54	0,332	-0,03	0,09	3,45	1303,65	1,71	0,183	0,37	0,64	1,08	0,02	1,81	1,267
16	руч. Сауришор	ВС-2	12,72	2,04	1,26	7,89	2,116	2,46	0,68	4,96	786,71	10,59	0,782	1,40	0,70	12,46	0,15	12,54	5,037
17		ВС-6	9,62	2,44	0,81	4,75	1,497	0,96	0,41	3,53	528,96	6,32	0,437	1,16	0,48	7,79	0,11	9,79	3,315
18		ВС-10	7,63	3,61	0,80	5,55	1,077	0,91	0,44	2,91	606,88	6,85	0,393	1,21	0,43	6,43	0,09	7,76	3,599
19		ВС-16	2,25	9,29	0,32	1,80	0,288	0,90	0,13	1,79	419,54	2,18	0,039	1,35	0,26	2,49	0,03	3,30	1,328
20		ВС-21	3,08	10,48	0,32	2,11	0,461	0,88	0,20	0,64	126,58	2,76	0,000	1,39	0,08	2,84	0,01	3,40	1,591
21		ВС-27	1,75	7,61	0,12	0,96	0,256	-0,31	0,12	0,70	160,15	1,31	-0,001	1,07	0,12	0,97	-0,01	1,84	0,830
22		ДВ-6	3,45	7,04	0,57	1,57	0,214	0,79	0,19	0,62	127,20	1,24	0,171	0,76	0,05	1,14	0,01	1,13	0,582
23		ДВ-5	7,21	1,54	0,62	4,16	1,261	1,11	0,38	2,75	724,82	2,99	0,487	0,45	0,27	2,32	0,01	1,92	1,170
24		ДВ-11	10,75	6,55	0,50	5,33	1,703	1,49	0,21	3,45	1378,39	6,27	0,885	1,97	0,50	5,74	0,09	8,14	3,002
25		120-5	н/о	н/о	0,00	н/о	н/о	1,30	н/о	0,00	690,00	2,36	0,670	н/о	н/о	н/о	н/о	3,68	1,610
26	120-15	н/о	н/о	0,00	н/о	н/о	1,44	н/о	0,00	610,00	2,25	0,073	н/о	н/о	н/о	н/о	5,02	2,500	
27	руч. Ветвистый	1/12	3,07	1,72	0,05	2,28	0,436	0,74	0,12	0,84	419,47	2,58	0,339	0,51	0,12	2,63	0,07	2,63	1,658
28		13/12	1,97	0,92	-0,06	1,64	0,135	-0,06	0,07	0,59	132,02	1,81	0,021	0,16	0,11	1,69	0,00	1,79	0,805
29		24/12	31,80	3,18	1,90	16,35	4,429	1,21	0,49	0,36	1082,71	14,74	1,959	0,57	0,34	8,76	0,13	8,30	5,122
30		28/12	9,38	0,30	0,70	7,06	1,174	1,96	0,28	3,11	1192,03	7,27	0,632	0,80	0,65	9,02	0,13	6,72	4,465
31		23-1/1	9,19	0,72	0,67	6,97	0,760	0,22	0,25	1,32	1810,08	7,18	0,722	0,84	0,61	1,76	0,03	5,38	3,017
32		123-2/12	2,59	3,57	-0,09	1,42	0,243	0,13	0,06	0,32	455,59	1,64	0,376	0,75	0,14	3,53	0,06	2,07	1,383
33		52/12	5,30	0,69	0,61	5,40	1,016	0,75	0,21	1,30	744,11	5,49	0,425	0,54	0,40	4,86	0,08	5,36	3,885

Максимальные содержания РЗЭ отмечаются в вулканомиктовых песчаниках хр. Енганэпэ, генетически связанных с основными вулканитами и на дискриминационных диаграммах (рис. 3) расположенных в поле активных континентальных окраин, минимальные – в хорошо сортированных прибрежно-морских песчаниках из верхних частей изученных разрезов. Общей особенностью всех проанализированных песчаников является наличие четко выраженной положительной европиевой аномалии. Максимальные значения  $Eu/Eu^{*UCC}$  (до 2,7) отмечаются в полевошпат-кварцевых песчаниках из основания прибрежно-морских толщ там, где они перекрывают континентальные отложения алькесвожской толщи.

Спектры распределения РЗЭ в метапесчаниках достаточно однородны и характеризуются резко пониженным по сравнению с PAAS содержанием РЗЭ, что объясняется доминированием в их составе кварца, слабо выраженной положительной европиевой аномалией и примерно равновесным соотношением легких и тяжелых РЗЭ (рис. 2, а). Исключение составил обр. М-39-1 из средней части толщи, представленный рассланцованным тонкозернистым метапесчаником, особенностью которого является присутствие значительного количества в цементе стильпномелана. В нем были обнаружены нетипичные для палеозойских отложений Урала

муассанит, самородный кремний и силицит железа (Никулова и др., 2011). Характер распределения РЗЭ в метапесчаниках хр. Енганэпэ сходен, а уменьшение содержания РЗЭ снизу вверх по разрезу отражает увеличение количества кварца и, соответственно, улучшение сортированности и степени зрелости обломочного материала, сопровождавшее постепенную смену источника сноса.

Метапесчаники из разреза на руч. Сауришор характеризуются близкими содержаниями и характером распределения РЗЭ. Относительное увеличение содержаний РЗЭ наблюдается в обр. СШ 2 из песчаников, залегающих в метре от зоны межформационного контакта и характеризующихся повышенной слюдистостью.

Наибольшей дифференцированностью характеризуются спектры распределения РЗЭ в песчаниках из разреза на руч. Сауришор, что в полной мере отражает характер строения разреза. Залегающие в основании разреза аллювиальные метапесчаники, аналоги алькесвожской толщи Приполярного Урала (Никулова, 2014), содержащие продукты переотложения коры выветривания, отличаются преобладанием тяжелых РЗЭ при отсутствии европиевой аномалии. Минимальные содержания РЗЭ при примерно равном соотношении легких и тяжелых РЗЭ отмечаются в метапесчаниках из верхней части разреза, максимальные с резким евро-

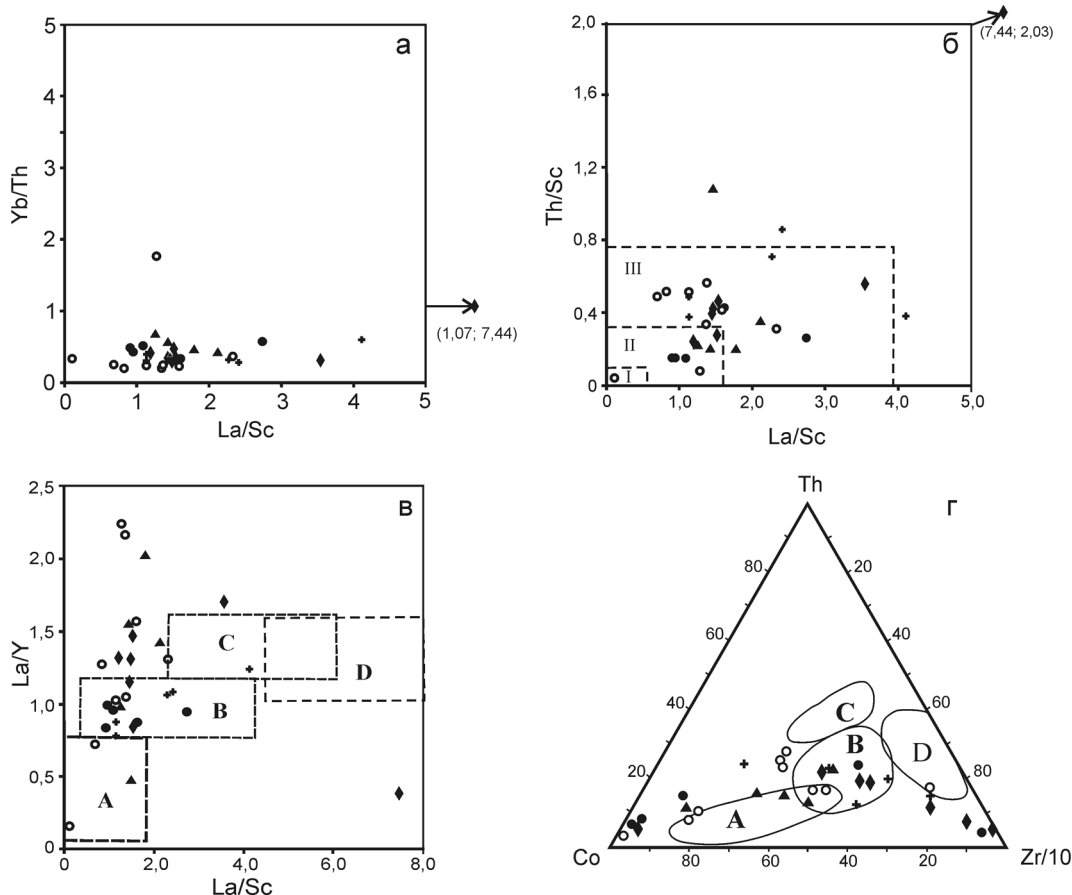


Рис. 3. Положение фигуративных точек составов песчаников на диаграммах Yb/Th–La/Sc, La/Sc–Th/Sc, La/Sc–La/Yb, Co–Th–Zr/10, по (Bhatia, Crook, 1986): 1 – хр. Енганэпэ, 2 – хр. Манитаньрд, 3 – р. Мал. Уса, 4 – руч. Сауришор, 5 – руч. Ветвистый; I – базиты; II – диориты; III – гранодиориты; А – океанические островные дуги; В – континентальные островные дуги; С – активная континентальная окраина; D – пассивная континентальная окраина

пиевым максимумом и преобладанием тяжелых РЗЭ над легкими — в песчаниках из нижней части разреза, залегающих как непосредственно на породах фундамента, так и на алькесвожских песчаниках.

Распределение РЗЭ в одном из образцов (обр. 1/12) из разреза на руч. Ветвистом не характерно для нормальных осадочных пород. Это единственный из всех проанализированных образцов, в спектре которого присутствует европиевый минимум, а тяжелые лантаноиды резко преобладают над легкими, что свидетельствует о присутствии в составе метапсаммитов продуктов разрушения неизмененных выветриванием основных пород и/или основной вулканокластике.

В целом отмечается однотипный характер распределения РЗЭ, минимальные количества которых встречены в песчаниках морского происхождения, максимальные — в вулканомиктовых (туфопесчаниках), а аллювиальные метапсаммиты занимают промежуточное положение. Спектры большинства исследованных образцов имеют слабовыраженный положительный наклон, характерный для метатерригенных пород, не связанных с вулканизмом. Исключение составили четыре образца (М-39-1, 1/12, ВС 16, ДВ 11), характеризующиеся заметным преобладанием тяжелых РЗЭ, что может указывать на присутствие в породе примеси основной пирокластике или продуктов размыва основных магматических пород. В большинстве изученных образцов отмечается положительная европиевая аномалия, слабовыраженная в южных разрезах (хр. Енганэпэ и Манитаньрд) и достаточно интенсивная в бассейне р. Мал. Уса, отражающая, по нашему мнению, количественное содержание в породах основных плагиоклазов, что подтверждается петрографическими данными, и, соответственно, вклад туфогенной примеси. Отмечается практическое отсутствие цериевой аномалии (в среднем  $Se/Ce^{*UCC}$  составляет 0,94) и комплексный состав РЗЭ (индикаторное отношение  $La/Yb$  варьирует от 3,4 до 20,5). В большинстве случаев наблюдается незначительный дефицит легких лантаноидов ( $LREE/HREE \approx 0,83$ ), хотя в 11 образцах прибрежно-морских песчаников установлено обратное соотношение (до 1,56).

По суммарному содержанию РЗЭ породы условно делятся на три группы — с пониженным содержанием РЗЭ — 25,3–77,1 мкг/г, указывающим на преобладание в области сноса пород основного состава, и с повышенными содержаниями Cr, Ni, Co и с содержанием РЗЭ 90,0–199,1, что свидетельствует о подчиненном количестве гранитоидов в области сноса. Два образца характеризуются высокой концентрацией РЗЭ (>200 мкг/г), предполагающей преобладание в области размыва пород кислого состава.

Повышенные по сравнению с PAAS содержания малоподвижных Sc, Zr и напрямую связанного с ними Hf, свидетельствующие об интенсивном химическом выветривании, наблюдаются в мета-

песчаниках аллювиального и мелководно-морского происхождения из разрезов на хр. Енганэпэ и руч. Сауришор. Пониженные содержания этих элементов, отвечающие тектонически активным обстановкам, отмечаются в морских слабо сортированных метапесчаниках из основания разреза. Вклад в повышенное содержание Zr в этих породах возможно внесло также естественное шлихование, характерное для устойчивых минералов тяжелой фракции. Соотношение  $Zr/Hf$  для большинства изученных образцов составило 36–40, а для метапесчаников хр. Енганэпэ и двух образцов из разреза на руч. Сауришор — 56–66, что характерно для источника, связанного с основными вулканами щелочного ряда.

Значения индикаторных соотношений  $Cr/Th$ ,  $Th/Co$ ,  $La/Co$  имеют весьма широкий разброс и предполагают смешанный состав пород, в отдельных случаях с доминированием базитового или кислого компонентов (Condie, 1990; Cullers, 2000). Отношение  $Th/U$  (McLennon, 1993) изменяется от 1,38 до 5,18, а максимальные значения (4,63–5,18) наблюдаются в мелководно-морских песчаниках хр. Енганэпэ и Манитаньрд.

Песчаники основания палеозойского разреза отличаются по химическому составу, степени зрелости и сортированности — в поле развития нижнепалеозойских отложений встречаются горизонты высокоглиноземистых аллювиально-делювиальных континентальных песчаников и гравелитов, мелководно-морских вулканогенно-терригенных и терригенных пород (Никулова, 2016). Последние, в базальной части разреза представленные полевошпат-кварцевыми разновидностями, характеризующимися плохой сортированностью и низкой степенью химической зрелости, вверх по разрезу сменяются хорошо сортированными практически монокварцевыми разновидностями, сложенными рециклированными обломками и с незначительным содержанием минералов-носителей редких земель. Такой характер строения разреза свидетельствует об одновременном существовании разнообразных, часто контрастных локальных режимов осадконакопления, нашедших свое отражение в геохимических параметрах отложений, слагающих основание палеозойского разреза.

Модуль  $Mo/Mn$  (Bhatia, Crook, 1986) в большинстве изученных образцов соответствует обстановкам умеренно выраженных редокс-условий, в четырех образцах песчаников значения этого модуля составляют тысячные доли процента, что соответствует обстановкам хорошо аэрируемого водоема. Незначительный разброс значений отношений  $V/(V+Ni)$  (Hatch, 1992) говорит о формировании отложений в различной степени от слабо до отчетливо выраженных редокс-условиях (значениями  $V/(V+Ni) > 0,7$ ). В одном образце кварцевого метапесчаника (обр. 22, хр. Енганэпэ) отношение  $Mo/Mn$  составило 0,2143, что должно указывать на сероводородное заражение водоема. В этих песчаниках содержится наи-



меньшее количество марганца (табл. 2) и РЗЭ, а значение  $V/(V+Ni)$  составляет 0,73. Коэффициенты, характеризующие фациальные условия осадконакопления:  $La/Sm$  (3,8–6,9),  $Ce/Sm$  (8,8–14,6),  $Yb/Sm$  (0,25–0,6),  $Y/Sm$  (3,6–6,2), свойственны мелководным условиям. Исключение составляют повышенные значения  $Yb/Sm$  и  $Y/Sm$  для аллювиальных песчаников разрезов на руч. Сауришор и Ветвистый. Значения  $Ce/Ce^*$  (0,83–1,11) соответствуют окраинно-континентальным обстановкам (Гурвич, 1998).

Степень однородности состава обломочного материала иллюстрирует диаграмма  $Yb/Th-La/Sc$ , на которой все фигуративные точки попадают в поле низких значений  $Yb/Th$ , при этом наблюдается достаточно широкий разброс значений  $La/Sc$  (рис. 3, а). Единственная точка, располагающаяся ближе к вертикальной оси (обр. ДВ 6), отражающая состав метапесчаника из средней части разреза на руч. Сауришор, предполагает преобладание в их составе обломков, источником которых были основные породы.

Роль обломков различного состава отражает соотношение  $Th/Sc$ , значения которого, превышающие 0,2, свидетельствуют о присутствии в песчаниках обломочного материала кислого состава (Condie, 1990). На диаграмме  $La/Sc-Th/Sc$  большинство фигуративных точек находятся в полях III и II, соответствующих гранодиоритам и диоритам, эффузивными аналогами которых являются широко распространенные в хойдышорской свите и подстилающих породах фундамента средние и кислые эффузивы базальт-риолитовой формации лядгейской свиты (рис. 3, б). Вне выделенных полей остались две фигуративные точки песчаников из разреза на хр. Манитаньрд и одна точка, соответствующая песчанику из разреза на р. Мал. Уса. По соотношению  $Eu/Eu^*$  изученные породы в большинстве своем отвечают постархейским тектонически активным обстановкам с вулканизмом (McLennan, 1989) и три образца, имеющие значение  $Eu/Eu^* < 0,85$ , принадлежат постархейским кратонным осадкам.

На диаграмме  $La/Sc-La/Yb$  (рис. 3, в) большинство точек сосредоточено в поле, соответствующем континентальным островным дугам или находится вне выделенных полей. Невысокие значения  $La/Yb$  могут свидетельствовать о формировании пород за счет размыва образований с низкой степенью фракционирования РЗЭ, что характерно для неизменных кислых вулканитов.

На треугольной диаграмме  $Co-Th-Zr/10$  (рис. 3, г) большинство точек также сосредоточено в поле континентальных островных дуг или находится вне выделенных полей. Вне полей отмечаются группы точек, тяготеющих к полю пассивной континентальной окраины, которым соответствуют хорошо сортированные монокварцевые метапесчаники, занимающие верхние части изученных разрезов, и точки, соответствующие метапесчаникам, пространственно связанным с телами основных вулканитов,

образованных в континентальной рифтогенной обстановке. Тяготение фигуративных точек метапесчаников к полям континентальных островных дуг и активных континентальных окраин (рис. 3, в, г) обусловлено тем, что значительную часть обломочного материала осадки унаследовали из подстилающих вулканогенных и плутонических пород фундамента, образовавшихся на островодужной и коллизионной стадиях формирования тиманид-протоуралид (Озеров и др., 2011).

### Заключение

Изучение распределения редких и редкоземельных элементов в песчаниках основания палеозойского разреза западной части Полярного Урала показало, что все их разновидности формировались в мелководных морских обстановках при отсутствии сероводородного заражения в окислительной обстановке. Метапесчаники аллювиального происхождения, содержащие продукты переотложения коры выветривания, отличаются преобладанием тяжелых РЗЭ при отсутствии европиевой аномалии. Минимальные содержания РЗЭ при примерно равном соотношении легких и тяжелых РЗЭ отмечаются в морских монокварцевых метапесчаниках из верхних частей изученных разрезов, промежуточные значения сумм РЗЭ – с резким европиевым максимумом и преобладанием тяжелых РЗЭ над легкими – в морских метапесчаниках, залегающих как непосредственно на породах фундамента, так и на алькесвожских аллювиальных породах. Туфопесчаники, слагающие отдельные горизонты разрезов на руч. Ветвистый и в верховье р. Мал. Уса, по составу и количеству РЗЭ близки кислым вулканитам.

Соотношения элементов-примесей, свидетельствующие об интенсивном химическом выветривании, наблюдаются в метапесчаниках аллювиального и мелководно-морского происхождения из разрезов на хр. Енганэпэ и руч. Сауришор. Песчаники образовались в условиях рифтогенеза на континентальной окраине и указывают на низкую степень химической зрелости исходных пород. Их образование шло за счет разрушения слабыветрелых магматических пород основного и кислого составов. Разброс содержаний элементов-примесей указывает на поликомпонентный состав метапесчаников, а изменяющееся соотношение вулканического и осадочного компонентов могло зависеть как от расстояния до источников вулканических обломков, так и от интенсивности периодически возобновлявшейся вулканической активности, а также вовлечения в область размыва новых областей, в том числе древних континентальных блоков.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований УрО РАН, проект 15-18-5-47.

## ЛИТЕРАТУРА

- Гурвич Е.И.* Металлоносные осадки Мирового океана. М.: Научный Мир, 1998. 340 с.
- Клюжина М.Л.* Палеогеография Урала в ордовикском периоде. М.: Наука, 1985. 187 с.
- Козырева И.В., Никулова Н.Ю.* Минералогия и геохимия пород в зоне межформационного контакта на хр. Саурипэ // Вестн. Ин-та геол. Коми НЦ УрО РАН. 2012. № 4. С. 2–6.
- Куликова К.В., Кузнецов Н.Б., Дорохов Н.С.* Формационная типизация и палеогеодинамическая позиция позднекембрийских и ранне-среднепалеозойских комплексов севера Урала // Петрология магматических и метаморфических комплексов. Мат-лы науч. конф. Вып. 2. Томск: ЦНТИ, 2001. С. 151–159.
- Никулова Н.Ю.* Особенности строения базальных горизонтов уралид в междуречье Малой Кары и Малой Усы // Литосфера. 2014. № 2. С. 125–130.
- Никулова Н.Ю.* Вещественный состав и условия образования базальных отложений уралид в бассейне р. Малая Уса (Полярный Урал) // Регион. геол. и металлогения. 2016. № 66. С. 20–29.
- Никулова Н.Ю., Козырева И.В.* Литохимические особенности и условия формирования нижнепалеозойских песчаников севера Урала // Отеч. геол. 2016. № 4. С. 46–55.
- Никулова Н.Ю., Филиппов В.Н., Симакова Ю.С., Швецова И.В.* Самородный кремний, силицид железа и муссанит в нижнепалеозойских песчаниках хр. Манитаньрд (Полярный Урал) // Вестн. Ин-та геол. Коми НЦ УрО РАН. 2011. № 1. С. 17–19.
- Никулова Н.Ю., Швецова И.В.* Литология и геохимия нижнепалеозойских отложений в зоне межформационного контакта уралид/доуралид на хр. Манитаньрд (Полярный Урал) // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2011. Т. 86, вып. 3. С. 47–54.
- Озеров В.С., Озерова Э.Н., Игнатович О.О.* Новые данные по геологии раннепалеозойских метаморфизованных россыпей золота на Севере Урала // Уральский геол. журн. 2011. № 6. С. 21–28.
- Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой). Екатеринбург: Роскомнедра, ИГиГ УрО РАН, 1993.
- Тейлор С.З., Мак-Леннан С.М.* Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
- Холодов В.Н., Недоумов Р.И.* О геохимических критериях появления сероводородного заражения в водах древних водоемов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1991. № 12. С. 74–82.
- Bhatia M.R., Crook K.A.W.* Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins // Contrib. Mineral. Petrol. 1986. Vol.108, N 1/2. P. 1–16.
- Condie K.C.* Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution // Earth Planet. Sci. Lett. 1990. Vol. 65. P. 1–12.
- Cullers R.L.* The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian–Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies // Lithos. 2000. Vol. 51. P. 181–203.
- Hatch J.R.* Relationship between inferred redox potential of the formation conditions and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone // Chem. Geol. 1992. Vol. 99. P. 65–82.
- McLennon S.M.* Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes // Mineral. Soc. Amer. Rev. 1989. Vol. 21. P. 169–200.
- McLennon S.M.* Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. Processes controlling the composition of clastic sediments // Geol. Soc. Amer. Spec. Paper. 1993. Vol. 284. P. 21–40.

**Сведения об авторах:** *Никулова Наталия Юрьевна* — докт. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотр. лаб литологии и геохимии осадочных формаций ИГ Коми НЦ УрО РАН, *e-mail:* nikulova@geo.komisc.ru; *Козырева Ирина Владимировна* — канд. геол.-минерал. наук, уч. секретарь ИГ Коми НЦ УрО РАН, *e-mail:* kozyreva@geo.komisc.ru