

# РЕДКИЕ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В КИАНИТОВЫХ РУДАХ КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА И УРАЛА

В. А. Коротеев, В. Н. Огородников, Ю. А. Поленов, А. Н. Савичев

## Rare and rare-earth elements in kyanite ores of Kola peninsula and the Urals

V. A. Koroteev, V. N. Ogorodnikov, Yu. A. Polenov, A. N. Savichev

Authors distinguish two groups of productive metamorphogenic-metasomatic rocks enriched with high-alumina minerals: stratified horizons in the stratum of plagiogneisses of early Archean and Proterozoic ages widely spread in Karelia and the Kola peninsula (Keyv formation) – aluminous (kyanite) formation of shields of the ancient platforms (metamorphic, Keyv type); unstratified metasomatic rocks that form the internal and external suture zones of the gneiss blocks, polyfacial metamorphic complexes of the andalusite-sillimanite and kyanite-sillimanite thermodynamic types, formed along the uneven-aged, typically pelitic rocks, widely manifested in the Urals – aluminous formation of folded belts (hydrothermal-metasomatic, Ural type). Comparison of the distribution of rare-earth elements in the rocks enclosing kyanite deposits of Keyv suite and Ural deposits revealed that they have the same type of directivity, but in the rocks of the Kola peninsula, the amount of rare-earth elements is higher. The reason is, apparently, a larger process of metamorphism and alkaline magmatism in the Kola peninsula in the Precambrian. A detailed study of kyanite deposits allowed to determine polygenic and polychronic properties of kyanite ores, as well as to identify three natural morphogenetic ore types: metamorphic, metamorphogenic-metasomatic and metasomatic. Comparison of the rare-earth elements shows that the metamorphogenic kyanites contain the greatest amount of rare-earth elements, and the lowest contents are characteristic for the metasomatic kyanites from quartz veins selvages and kyanite porphyroblasts of recrystallization zones. Deposit reserves of the metamorphogenic-metasomatic kyanites are low. In order to increase their economic importance the authors advise to implement the industrial development of kyanite deposits containing rare and rare-earth elements at levels that allow under certain dressing technologies to carry out their complementary profitable extraction.

**Keywords:** rare elements; dispersed elements; kyanite ore; Urals; Kola peninsula; factor analysis; aluminous formation.

Выделено две группы продуктивных метаморфогенно-метасоматических пород, обогащенных высокоглиноземистыми минералами: стратифицированные горизонты в толще плагииогнейсов раннего архея и протерозоя, широко проявленные в Карелии и на Кольском полуострове (свита Кейв) – глиноземистая (кианитовая) формация щитов древних платформ (метаморфогенный, кейвский тип); нестратифицированные метасоматические породы, слагающие внутренние и внешние шовные зоны гнейсовых блоков, полифациальных метаморфических комплексов андалузит-силлиманитового и кинанит-силлиманитового термодинамических типов, образующихся по разновозрастным, обычно пелитовым породам, широко проявленные на Урале – глиноземистая формация складчатых поясов (гидротермально-метасоматический, уральский тип). Сопоставление распределения редкоземельных элементов в породах, вмещающих кинанитовые месторождения кейвской свиты и уральских месторождений, показало, что они имеют однотипную направленность, но в породах Кольского полуострова количество редкоземельных элементов выше. Обусловлено это, по-видимому, более масштабными процессами метаморфизма и щелочного магматизма на Кольском полуострове в докембрии. Детальное изучение кинанитовых месторождений позволило установить полигенность и полихронность кинанитовых руд, а также выделить три природных морфогенетических типа руд: метаморфогенный, метаморфогенно-метасоматический и метасоматический. Факторный анализ показал, что наиболее значимые преобразования пород сопровождаются, прежде всего, резкими изменениями в поведении редкоземельных элементов. Из сравнения редкоземельных элементов видно, что метаморфогенные кинаниты содержат их наибольшее количество, а наименьшие содержания характерны для метасоматических кинанитов из залебандов кварцевых жил и порфириобласт кинанита зон перекристаллизации. Запасы месторождений метаморфогенно-метасоматических кинанитов небольшие. Для повышения их экономической значимости целесообразно промышленное освоение кинанитовых месторождений, содержащих редкие и редкоземельные элементы в количествах, позволяющих при определенных технологиях обогащения осуществлять их попутное рентабельное извлечение.

**Ключевые слова:** редкие элементы; рассеянные элементы; кинанитовые руды; Урал; Кольский полуостров; факторный анализ; глиноземистая формация.

Докембрием связана значительная масса редкоземельных руд в пегматитах, щелочных, редкометалльных гранитах и карбонатитах, содержащих высокие концентрации редких и редкоземельных элементов (РЗЭ). В фанерозойских складчатых структурах аналогичные месторождения размещаются в докембрийских блоках в тесных пространственных и генетических связях с наиболее глубинными субмантийными субщелочными гранитоидами и карбонатитами. Эти ассоциации, как известно, структурно приурочены к зонам длительно развивающихся глубинных разломов рифтогенной природы, где широко развиты месторождения кинанитовых кварцитов [1, 2].

Процесс регионального метаморфизма и сопутствующему ему определенному типу магматизма как рудогенерирующему фактору придается все более значительная роль в формировании месторождений, залегающих в глубокометаморфизованных комплексах докембрия. Уста-

новление природы метаморфогенных руд заключается в установлении генетических связей кинанитовых руд с тем или иным типом регионального метаморфизма, сопутствующего магматизма и сопровождающих их гидротермально-метасоматических преобразований. Выявлены причины локализации руд в определенных частях кристаллических толщ, установлены зависимости состава и масштабов рудогенеза, показана роль шовных зон, которые в докембрии представляли собой зоны рифтинга (растяжения). Во время коллизионных преобразований шовные зоны являлись высокобарическими зонами дислокационного метаморфизма [2, 3].

Среди метаморфических формаций докембрия развит достаточно широкий спектр месторождений полезных ископаемых (глиноземистые, марганцевые, железорудные, золото-урановые и др.). Подавляющее большинство месторождений глиноземистого сырья, связанных с глиноземистыми сланцами осадочного генезиса, независимо от их возраста (архей или протерозой) залегают в породах, метаморфизованных в условиях амфиболитовой фации. Их масштабы зависят от формационной принадлежности.

В настоящее время [4, 5] выделено две группы продуктивных метаморфогенно-метасоматических пород, обогащенных высокоглиноземистыми минералами:

- стратифицированные горизонты в толще плагииогнейсов раннего архея и протерозоя, широко проявленные в Карелии и на Кольском полуострове (свита Кейв), – глиноземистая (кианитовая) формация щитов древних платформ (метаморфогенный, кейвский тип);

- нестратифицированные метасоматические породы, слагающие внутренние и внешние шовные зоны гнейсовых блоков, полифациальных метаморфических комплексов андалузит-силлиманитового и кинанит-силлиманитового термодинамических типов, образующихся по разновозрастным, обычно пелитовым породам, широко проявленные на Урале, – глиноземистая формация складчатых поясов (гидротермально-метасоматический, уральский тип).

Для большинства зональных метаморфических комплексов Кольского полуострова, Карелии, Сибири, Урала, в которых кинанит-, силлиманитсодержащие породы слагают определенные зоны метаморфизма и развиваются по постархейским, постпротерозойским пелитовым толщам, зоны обогащения высокоглиноземистыми минералами приурочены к шовным зонам с активным проявлением метасоматоза и окварцевания с образованием метаморфогенного, метаморфогенно-метасоматического и метасоматического типов оруденения.

При анализе генезиса месторождений неметаллических полезных ископаемых (кианита, мусковита, талька, керамического сырья, антофиллита, горного хрусталя и т. д.), многие из которых связаны с различными типами гранитоидов, чаще всего не анализируется поведение рудных, редкометалльных, редкоземельных, благородных и радиоактивных элементов. Эти элементы, находясь в виде изоморфных или механических

Таблица 1. Статистические параметры содержаний элементов-примесей во вмещающих породах Кейв и Урала (ppm).

Элемент	Кейвы		Урал		Элемент	Кейвы		Урал		Элемент	Кейвы		Урал	
	$X_{cp}$	$\sigma$	$X_{cp}$	$\sigma$		$X_{cp}$	$\sigma$	$X_{cp}$	$\sigma$		$X_{cp}$	$\sigma$	$X_{cp}$	$\sigma$
Li	47,98	50,08	1,14	1,22	Zr	181,5	225,98	34,37	31,22	Gd	6,27	3,53	2,60	1,88
Be	1,76	1,51	0,67	0,57	Nb	9,86	6,75	2,10	2,27	Tb	0,68	0,31	0,43	0,31
Sc	12,54	6,78	12,01	11,03	Mo	0,54	0,49	5,53	7,40	Dy	3,58	1,46	2,65	1,95
Ti	4008,62	3076,77	1961,28	2601,05	Ag	0,54	0,32	0,02	0,02	Ho	0,65	0,25	0,55	0,42
V	140,73	102,41	104,86	83,62	Cd	0,05	0,05	0,17	0,24	Er	1,71	0,71	1,52	1,18
Cr	275,55	592,38	296,27	456,47	Sn	4,32	3,14	0,64	0,58	Tm	0,25	0,12	0,22	0,17
Mn	666,79	525,04	413	525,82	Sb	0,28	0,33	0,52	1,05	Yb	1,72	0,91	1,36	1,09
Co	23,51	30,01	17,12	27,61	Te	0,04	0,04	0,13	0,08	Lu	0,27	0,16	0,21	0,17
Ni	132,02	290,48	112,16	167,01	Cs	4,27	3,98	0,67	1,05	Hf	5,48	6,47	1,06	0,94
Cu	11,93	7,55	49,26	64,76	Ba	285,08	242,38	157,28	189,27	Ta	0,82	0,62	0,11	0,19
Zn	56,29	31,23	40,05	48,24	La	37,73	27,42	10,54	8,80	W	1,37	1,87	0,86	0,75
Ga	18,59	9,16	7,51	6,96	Ce	75,09	55,12	23,20	19,09	Tl	0,70	0,71	0,14	0,16
Ge	1,93	1,11	7,24	6,77	Pr	9,20	6,54	3,01	2,57	Pb	13,62	10,96	26,49	46,4
Rb	53,53	45,59	29,52	45,05	Nd	33,97	23,75	12,36	10,43	Bi	1,01	1,98	0,20	0,21
Sr	62,11	58,34	83,2	132,65	Sm	5,92	3,79	2,66	1,95	Th	11,94	10,60	2,71	1,45
Y	12,32	4,49	17,28	17,85	Eu	1,24	0,62	0,62	0,51	U	2,71	2,53	2,92	1,41

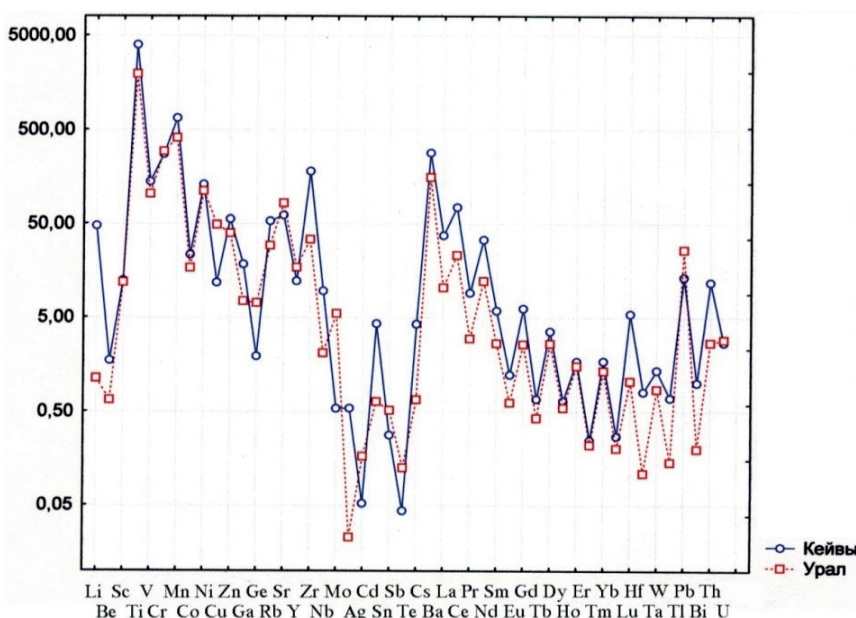


Рисунок 1. Распределение средних содержаний  $X_{cp}$  элементов-примесей во вмещающих породах месторождений кианита Кейв и Урала / Figure 1. Distribution of the average contents of  $X_{av}$  of impurity elements in the host rocks of kyanite deposits of the Keyv and the Urals.

примесей в таких минералах, характеризуют геологическую обстановку, являются производным тех ультраметаморфических, магматических, постмагматических и гидротермальных процессов, которые осуществляются от докембрия до фанерозоя.

К. И. Розанов и Д. А. Минеев [6] предполагают, что гранитизация архейских и протерозойских толщ сопровождается миграцией тяжелых лантаноидов в верхние структурные этажи. В ходе гранитизации продукты анатексиса относительно обогащаются легкими лантаноидами. Тяжелые лантаноиды выносятся при процессах ультраметаморфизма. Значительное разделение РЗЭ достигается при щелочно-фторидном метасоматозе, где также тяжелые лантаноиды и иттрий выносятся в зоны эндоконтактов интрузий. Со щелочными и субщелочными гранитоидами докембрия связаны типичные гидротермальные проявления, формирующиеся в условиях различных температур и давлений. Специфическая особенность этих гидротермальных образований – появление в них в значительных количествах минералов редких земель (фторкарбонаты, фосфаты, силикофосфаты), ниобия, ильменита или ильменорутила, молибденита и других сульфидов. С развитием щелочного магматизма и метасоматизма связана геохимия Nb (Ta), Zr (Hf) и редких земель (TR). Каждому крупному генотипу пород свойственны определенные парагенезисы, несущие эти элементы. Их включение в кристаллические решетки идет на протяжении всего магматического процесса с преимущественным обогащением более поздних фаз и постмагматических этапов.

Большие Кейвы – уникальная провинция высокоглиноземистых кристаллических сланцев докембрия на Кольском полуострове [7–10]. Уральские месторождения кианита размещаются в гнейсовых толщах докембрийского возраста и весьма схожи с месторождениями свиты Кейв, но уступают им по масштабам проявления [5, 6].

Вмещающие плагиогнейсы кианитовых месторождений Кейв и Урала были проанализированы методом ICP MS на приборе ELAN 9000 DRC-e. Среднестатистические значения содержаний редких, редкоземельных, благородных и радиоактивных элементов приведены в табл. 1 и на рис. 1. Из таблицы и рисунка видно, что вмещающие породы Кольского полуострова по ряду элементов количественно превосходят породы Урала. Таковыми являются Li, Be, Ti, Rb, Zr, Nb, Sn, Ba, La, TR (Ce-группы), Hf, Ta, Bi, Th. Обусловлено это более масштабными процессами метаморфизма, ультраметаморфизма, широкого развития процессов щелочного магматизма и карбонатитов, создающих редкоземельную специализацию докембрия по отношению к фанерозою.

Сопоставление распределения редкоземельных элементов в породах, вмещающих кианитовые месторождения кейвской свиты и уральских месторождений, показало, что они имеют однотипную направленность, но в породах Кольского полуострова количество РЗЭ выше (рис. 2). Обусловлено это, по-видимому, более масштабными процессами метаморфизма и щелочного магматизма на Кольском полуострове в докембрии.

Алюмокремниевые метасоматиты глиноземистой формации локализируются в шовных долгоживущих зонах складчатых областей и отчетливо накладываются на метаморфогенные кианитовые руды.

Таблица 2. Распределение элементов-примесей в кианитах различных морфогенетических типов Кольского полуострова и Урала (ppm).

Элемент	Метаморфические		Метаморфогенно-метасоматические		Метасоматические			
					Оторочки кварцевых жил		Порфириобласты зон перекристаллизации	
	$X_{cp}$	$\sigma$	$X_{cp}$	$\sigma$	$X_{cp}$	$\sigma$	$X_{cp}$	$\sigma$
Li	39,087	56,000	7,466	21,108	6,767	10,184	3,311	2,297
Be	1,346	1,491	0,645	0,799	0,107	0,059	0,215	0,107
Na	1101,150	454,230	962,926	1276,460	981,170	983,196	387,880	193,840
Sc	6,272	5,486	3,926	5,143	1,065	1,781	0,542	0,599
Ti	4637,060	3263,830	3698,900	2499,240	1055,680	1387,940	2766,470	1997,520
V	127,208	92,512	123,354	112,396	232,814	228,068	154,912	51,319
Cr	89,733	71,085	49,567	78,283	9,825	6,155	277,432	234,930
Mn	400,528	371,024	37,818	108,644	6,797	4,220	12,313	7,499
Co	8,846	7,453	1,353	3,944	0,183	0,091	0,323	0,238
Ni	22,043	13,866	3,306	6,420	3,787	7,669	1,565	1,172
Cu	16,807	10,309	11,874	7,895	4,880	3,486	7,700	4,494
Zn	47,951	30,139	15,095	16,800	5,194	3,848	9,257	6,015
Ga	22,138	11,978	22,541	12,597	13,661	15,738	27,003	9,109
Ge	2,375	1,673	1,839	1,322	2,126	2,006	2,876	1,030
Rb	30,101	43,483	9,198	16,897	4,780	7,419	1,819	3,068
Sr	35,661	31,529	20,665	29,983	18,725	33,899	12,389	14,057
Y	6,506	4,973	6,071	7,018	0,615	0,959	1,013	0,637
Zr	137,392	98,359	192,284	217,559	59,936	125,661	92,188	42,014
Nb	10,885	7,079	9,764	7,866	1,139	2,309	6,787	4,749
Mo	0,337	0,296	0,767	0,710	0,141	0,171	0,295	0,272
Ag	0,533	0,321	0,421	0,358	0,127	0,129	0,243	0,134
Cd	0,029	0,018	0,023	0,052	0,002	0,002	0,017	0,023
Sn	3,043	1,569	2,933	2,534	1,367	1,592	1,267	0,860
Sb	0,277	0,237	1,275	1,200	0,226	0,208	0,976	0,559
Te	0,039	0,026	0,055	0,131	0,010	0,015	0,018	0,028
Cs	2,011	2,658	0,497	1,052	0,100	0,176	0,043	0,040
Ba	169,07	192,074	90,519	156,690	22,350	22,049	35,130	48,800
La	29,817	23,885	28,494	43,747	4,750	6,872	3,920	3,539
Ce	62,139	47,576	65,308	113,261	10,500	16,060	6,919	6,387
Pr	7,235	5,823	7,770	14,430	1,225	2,086	0,755	0,669
Nd	26,699	20,543	30,914	60,518	4,824	8,816	2,755	2,427
Sm	4,487	3,341	6,012	12,194	0,717	1,407	0,477	0,371
Eu	0,906	0,622	0,857	1,228	0,154	0,297	0,108	0,072
Gd	4,041	3,144	4,311	8,844	0,500	1,049	0,349	0,210
Tb	0,403	0,310	0,396	0,683	0,039	0,074	0,053	0,031
Dy	1,969	1,522	1,848	2,737	0,196	0,342	0,296	0,157
Ho	0,333	0,265	0,305	0,397	0,035	0,057	0,052	0,028
Er	0,868	0,703	0,780	0,929	0,091	0,144	0,135	0,071
Tm	0,127	0,105	0,115	0,137	0,013	0,020	0,019	0,010
Yb	0,893	0,734	0,826	1,039	0,099	0,152	0,135	0,097
Lu	0,144	0,119	0,132	0,181	0,019	0,029	0,022	0,015
Hf	3,991	2,859	5,632	6,294	1,600	3,272	2,469	1,008
Ta	0,879	0,539	1,168	1,254	0,159	0,308	0,608	0,327
W	3,430	4,837	302,200	1448,330	7,086	7,487	310,670	666,310
Tl	0,296	0,329	0,158	0,326	0,027	0,030	0,030	0,038
Pb	12,558	7,786	29,890	61,288	1,327	0,975	13,634	7,200
Bi	0,232	0,181	0,345	0,485	0,006	0,006	0,258	0,225
Th	12,439	9,238	8,592	14,170	1,300	1,901	1,858	2,018
U	3,340	1,360	4,123	3,223	0,506	0,654	1,918	0,850

Образование алюмокремниевых метасоматитов обусловлено химическим воздействием инфильтрующегося раствора на горные породы, они формируются в широком диапазоне температуры и давления тем ин-

тенсивней, чем активнее раствор и выше проницаемость пород. Естественно, для развития таких метасоматитов наиболее благоприятны зоны пониженных динамических нагрузок, чем и определяется приурочен-

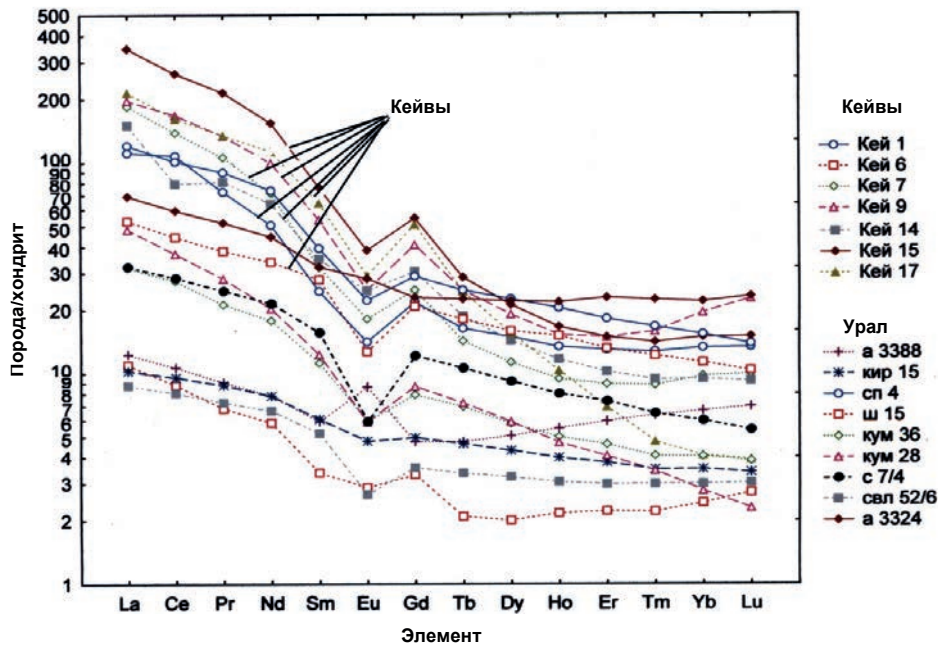


Рисунок 2. Распределение редкоземельных элементов, нормированных по хондриту во вмещающих породах месторождений кyanита кейвской свиты и месторождений кyanита на Урале / Figure 2. Distribution of the rare-earth elements normalized by chondrite, in the host rocks of kyanite deposits of the Keivv formation and the Urals.

ность их к структурам растяжения, участкам повышенной трещиноватости и т. д. Соответственно, для возникающих ассоциаций характерны минералы более низкой структурной плотности, в которых алюминий в четверной координации преобладает над алюминием в шестерной координации: силлиманит, андалузит, мусковит и т. д.

Таким образом, образование месторождений высокоглиноземистых минералов связывается с метаморфическими комплексами архейско-протерозойского возраста и метасоматическим преобразованием их во время орогенеза. Метаморфогенно-метасоматический механизм образования кyanитовых месторождений создает относительно стратифицированные залежи с крупными запасами, наибольшие из которых сконцентрированы на Кольском полуострове (свита Кейв), в Карелии, Сибири и на Урале.

Детальное изучение кyanитовых месторождений позволило установить полигенность и полихронность кyanитовых руд, а также выделить три природных морфогенетических типа руд: метаморфогенный,

метаморфогенно-метасоматический и метасоматический, которые различаются минеральным и гранулометрическим составами и характером сростаний кyanита с другими минералами [2, 5, 10–12].

Эти разновидности кyanитов были проанализированы методом ICP MS. Согласно анализу поведения средних значений редких и редкоземельных элементов в различных морфогенетических типах кyanитов Кейв и Урала (табл. 2) установлено, что наиболее высокие содержания РЭ и РЗЭ характерны для метаморфогенных руд, а наибольший разброс значений – для РЗЭ (рис. 3).

Факторный анализ по программе Statistica-7 (метод главных компонент с варимаксным вращением), проведенный по всей совокупной выборке кyanитов Кольского полуострова (кейвская серия) и Урала (табл. 3), показал, что наиболее значимый фактор-1 характеризует метаморфогенный тип кyanитов, которые образуются в породах докембрийского возраста, в которых широко развиты щелочные гранитоиды, с которыми связана редкоземельная минерализация:

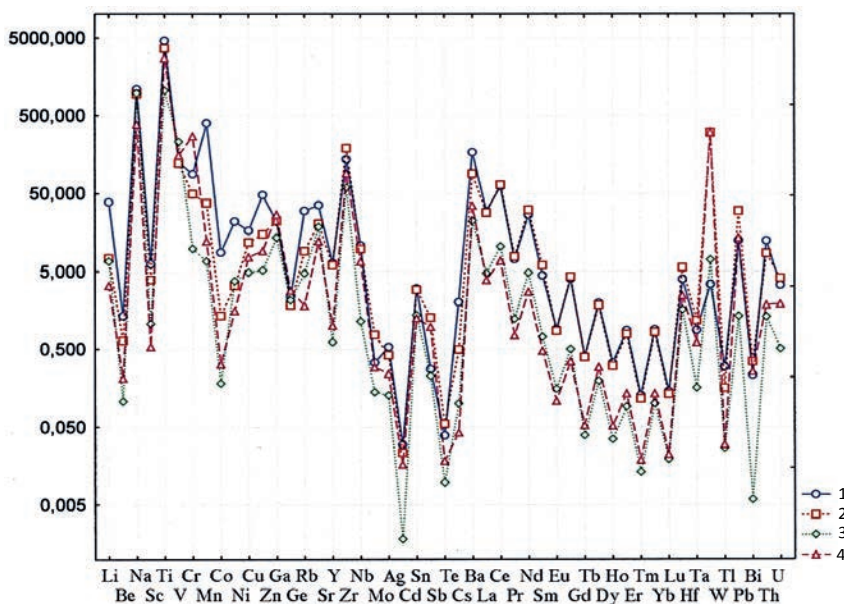


Рисунок 3. Распределение средних содержаний  $X_{av}$  элементов-примесей в кyanитах разных морфогенетических типов Кейв и Урала. 1 – метаморфогенные; 2 – метасоматические; 3 – оторочки кварцевых жил; 4 – порфиробластические кyanиты зон перекристаллизации / Figure 3. Distribution of the average contents of  $X_{av}$  of impurity elements in kyanites of different morphogenetic types of the Keivv and the Urals.

Таблица 3. Факторные нагрузки, характеризующие поведение элементов-примесей в кианитах месторождений Кольского полуострова и Урала (метод главных компонент с варимаксным вращением).

Элемент	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5
Li	0,02396	*0,640632	-0,032731	0,286093	-0,030892
Be	0,15281	**0,756701	0,291481	0,280706	0,054318
Na	0,08735	*0,591075	0,368909	-0,237860	-0,133997
Sc	0,26547	**0,812358	0,164857	-0,094653	0,182681
Ti	-0,05374	0,131370	0,231870	*0,536645	0,456534
V	-0,16682	-0,056328	-0,216718	*0,502176	-0,024014
Cr	-0,13949	-0,070399	-0,017908	*0,528024	-0,012386
Mn	0,07479	*0,526008	0,001499	*0,587462	0,025950
Co	0,09391	*0,578605	0,020230	*0,594680	0,100571
Ni	0,09863	0,333805	0,004777	0,435340	0,340397
Cu	0,06318	0,375676	*0,516575	0,340655	0,220518
Zn	0,31196	*0,625978	0,143613	0,461192	0,079084
Ga	-0,19276	-0,057190	0,444563	*0,596462	-0,059911
Ge	-0,15670	-0,102358	0,028595	*0,652409	-0,358820
Rb	0,19888	**0,868069	0,168010	0,094582	-0,000559
Sr	0,11869	*0,676062	-0,025605	-0,365482	-0,017137
Y	**0,78375	0,325397	0,453399	-0,070731	-0,065860
Zr	0,33093	0,082354	**0,866005	-0,69790	-0,011831
Nb	0,00924	0,104922	**0,783678	0,372629	0,294340
Mo	0,22204	0,162322	0,313626	-0,199406	*0,524493
Ag	0,17414	0,287119	**0,785939	0,244989	0,095255
Cd	0,02837	0,212045	0,129233	0,338036	0,306782
Sn	0,12114	0,161616	**0,785713	0,103719	-0,000994
Sb	-0,09371	-0,372153	0,206611	0,127228	0,411150
Te	0,00393	0,026796	-0,045824	-0,079547	*0,688210
Cs	0,27949	**0,778608	0,190389	0,178476	0,018507
Ba	0,14296	**0,889961	0,065955	-0,059210	0,112689
La	**0,93141	0,091844	0,115094	0,017494	0,136274
Ce	**0,97968	0,038975	0,068523	0,003276	0,075500
Pr	**0,98673	0,026558	0,048701	-0,003315	0,038018
Nd	**0,98655	-0,008178	0,024368	-0,006213	0,014655
Sm	**0,96156	-0,044542	0,013227	-0,010480	-0,023613
Eu	**0,95122	0,140475	0,089888	-0,004491	0,082046
Gd	**0,97384	0,042108	0,073467	-0,014598	-0,067079
Tb	**0,97036	0,130127	0,165935	0,005645	-0,052020
Dy	**0,91182	0,236527	0,283160	-0,006693	-0,043710
Ho	**0,82129	0,338987	0,393694	-0,030474	-0,055223
Er	**0,71305	0,415432	0,483508	-0,048135	-0,068517
Tm	*0,61610	0,437213	*0,556715	-0,071647	-0,092976
Yb	*0,55868	0,420592	*0,607829	-0,098044	-0,115475
Lu	*0,52997	0,415845	*0,620244	-0,117684	-0,130371
Hf	0,35328	0,094652	**0,864889	-0,068568	-0,039511
Ta	-0,02599	-0,046945	*0,563235	0,135286	0,365160
W	-0,01825	-0,123216	0,110796	0,194395	0,117890
Tl	0,25482	**0,712405	0,458553	-0,058884	-0,072935
Pb	0,08376	-0,093126	0,178886	0,293791	0,112365
Bi	0,02509	0,123489	0,101212	0,041970	**0,775716
Th	**0,91523	0,252812	0,076579	0,010123	0,123703
U	*0,50803	0,016294	**0,726630	-0,063180	0,258364

\*Факторные нагрузки со значением 0,5–0,7 при уровне значимости 0,05; \*\*факторные нагрузки со значением > 0,7 при уровне значимости 0,01.

Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Th, U  
Фактор - 1 – 13,09

Фактор-2 характеризует обстановку внедрения щелочных и субщелочных гранитоидов, пегматитов (Li–Be-направленности), сопровождаемых процессами альбитизации, грейзенизации, мусковитизации

и формирования метаморфогенно-метасоматических кианитов, представленных радиально-лучистыми, тонкопризматическими разностями:

Li, Be, Na, Sc, Mn, Co, Zn, Rb, Sr, Cs, Ba, Tl  
Фактор - 2 – 7,9

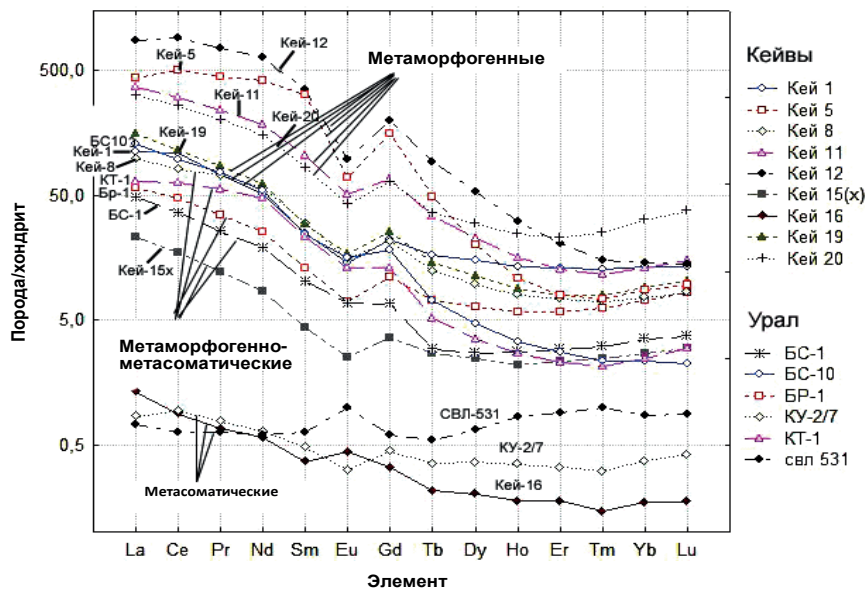


Рисунок 4. Распределение редкоземельных элементов, нормированных по хондриту / Figure 4. Distribution of the rare-earth elements normalized by chondrite in kyanites of various morphogenetic types in deposits of Keyv and the Urals.

Фактор-3 характеризует обстановку развития гидротермально-метасоматических процессов, сопровождаемых формированием метасоматических кианитовых кварцитов с кианитом игольчатого облика, образующих радиально-лучистые агрегаты, отложением сульфидов, циркона, тантало-ниобатов и урановой минерализации:

$$\text{Фактор - 3} - 7,32 \frac{\text{Cu, Zr, Nb, Ag, Sn, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, U}}{\text{---}}$$

Фактор-4 характеризует зоны переотложения сидерофильных элементов в зонах кислотного выщелачивания, интенсивной мусковитизации (фукситизации) и перекристаллизации кианитов с образованием хорошо окристаллизованных, крупнопорфиробластовых кристаллов кианита с большим количеством включений гематита и иголок рутила, от которых очень сложно избавиться при обогащении:

$$\text{Фактор - 4} - 3,8 \frac{\text{Ti, V, Cr, Mn, Co, Ga, Ge}}{\text{---}}$$

Фактор-5 характеризует позднюю стадию образования метасоматического игольчатого кианита, претерпевшего активное расщепление с образованием сферолитов и конкреций и осаждением висмута, молибдена и теллуридов:

$$\text{Фактор - 5} - 2,64 \frac{\text{Mo, Bi, Te}}{\text{---}}$$

Факторный анализ показал, что наиболее значимые преобразования пород сопровождаются, прежде всего, резкими изменениями в поведении РЗЭ.

Из сравнения редкоземельных элементов видно, что метаморфогенные кианиты содержат наибольшее количество РЗЭ (рис. 4), а наименьшие содержания характерны для метасоматических кианитов из зальбандов кварцевых жил и порфиробластов кианита зон перекристаллизации.

Запасы метасоматического кианита небольшие, поэтому наиболее целесообразно разрабатывать метаморфогенно-метасоматические кианиты, которые содержат примеси в количестве, позволяющем при определенных технологиях обогащения добывать кианитовое сырье в промышленных масштабах, попутно добывая РЭ и РЗЭ. Такой опыт получен на месторождениях Кольского полуострова [11]. В лабораторных условиях из крупноконкреционной руды (метаморфогенно-метасоматический тип) месторождения Новая Шуурурта, кроме кианитового концентрата, получен черновой концентрат РЭ и РЗЭ. Достигнуто содержание суммы РЗЭ и иттрия 1,62 %, редких элементов 0,37 %. Кон-

центрирование РЗЭ происходит неравномерно, элементов цериевой группы – в 11–13 раз относительно исходной руды, элементов иттриевой группы – от 1,5 до 8 раз. В 13 раз увеличилась и концентрация Th. С учетом минералогических данных предполагается, что основной концентрат РЗЭ цериевой группы и Th – монацит. Таким образом, доказана возможность получения концентрата РЭ и РЗЭ из рядовых конкреционных кианитовых руд.

Работа выполнена в рамках Программ фундаментальных исследований № 14-23-24-27 Президиума РАН и Интеграционного проекта «Развитие минерально-сырьевой базы России...» (руководитель проекта академик РАН В. А. Коротеев) и Президиума УрО РАН № 15-11-5-17. Кроме того, исследования частично финансировались по госзаданию ФАНО по теме 0393-2014-0022 «Геохимические факторы зарождения и эволюции эндогенных рудогенерирующих систем складчатых областей», руководитель профессор В. Н. Огородников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев К. Д., Ганеев И. Г., Чайка В. И., Чернов В. Д. Рудные ресурсы и их размещение по геоэпохам. Редкие металлы: тантал, ниобий, скандий, редкие земли, цирконий, гафний: справ. пособие. М.: Недра, 1996. 176 с.
2. Огородников В. Н., Сазонов В. Н., Поленов Ю. А. Минералогия шовных зон Урала. Уфалейский гнейсово-амфиболитовый комплекс (Южный Урал). Екатеринбург: Изд-во Ин-та геологии и геохимии УрО РАН – УГГУ, 2007. 187 с.
3. Огородников В. Н., Сазонов В. Н., Поленов Ю. А. Минералогия шовных зон Урала. Кочкарский рудный район (Южный Урал). Екатеринбург: УГГГА, 2004. 216 с.
4. Коротеев В. А., Огородников В. Н., Войтеховский Ю. Л. и др. Небокситовое алюминиевое сырье России. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 228 с.
5. Огородников В. Н., Коротеев В. А., Войтеховский Ю. Л. и др. Кианитовые руды России. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 334 с.
6. Розанов К. И., Минеев Д. А. Геохимическая характеристика докембрийских гранитоидов Приазовья // Геохимия. 1973. № 2. С. 238–249.
7. Бельков И. В. Кианитовые сланцы свиты Кейв. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 136 с.
8. Бельков И. В. Кианитовые месторождения // Минеральные месторождения Кольского полуострова. Л.: Наука, 1981. С. 163–177.
9. Лутц Б. Г., Минеев Д. А. Парагенетический анализ, геохимия и минералогия метаморфических пород Уфалейского массива на Урале // Редкие элементы в породах различных метаморфических фаций. М.: Наука, 1967. С. 59–104.
10. Войтеховский Ю. Л. Кианитовые сланцы Б. Кейв – стратегический ресурс России // Проблемы освоения кианитовых месторождений Кольского полуострова, Карелии и Урала. Апатиты: Горный ин-т КНЦ РАН, 2010. С. 3–21.
11. Каменева Е. Е., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В., Букчина О. В. Особенности вещественного состава и технологические свойства кианитовых руд Хизоваарского месторождения // Обогащение руд. 2003. № 6. С. 17–21.
12. Щипцов В. В., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П., Данилевская Д. А. Роль геологических, минералогических и технологических исследований Института геологии КарНЦ РАН в оценке потенциала минерально-сырьевой базы Республики Карелия // Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы: сб. науч. тр. Петрозаводск, 2010. С. 37–55.

## REFERENCES

1. Belyaev K. D., Ganeev I. G., Chayka V. I., Chernov V. D. 1996, *Rudnye resursy i ikh razmeshchenie po geopokham. Redkie metally: tantal, niobiy, skandiy, redkie zemli, tsirkoniy, gafniy. Spravochnoe posobie* [Ore resources and their placement along the geo eras. Rare metals: tantalum, niobium, scandium, rare-earths, zirconium, hafnium. A Reference guide], Moscow, 176 p.
2. Ogorodnikov V. N., Sazonov V. N., Polenov Yu. A. 2007, *Minerageniya shovnykh zon Urala. Ufaleyskiy gneysovo-amfibolitovyy kompleks (Yuzhnyy Ural)* [Minerageny suture zones of the Urals. Ufaleys gneiss-amphibolite complex (the South Urals)], Ekaterinburg, 187 p.
3. Ogorodnikov V. N., Sazonov V. N., Polenov Yu. A. 2004, *Minerageniya shovnykh zon Urala. Kochkarskiy rudnyy rayon (Yuzhnyy Ural)* [Minerageny suture zones of the Urals. Kochkarskoye ore district (Southern Urals)], Ekaterinburg, 216 p.
4. Koroteev V. A., Ogorodnikov V. N., Voytekhovskiy Yu. L., Shchiptsov V. V., Polenov Yu. A., Savichev A. N., Koroteev D. V. 2011, *Neboksitovoe alyuminiove syr'e Rossii* [Non bauxite aluminum raw materials of Russia], Ekaterinburg, 228 p.
5. Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Voytekhovskiy Yu. L., Shchiptsov V. V., Polenov Yu. A., Neradovskiy Yu. N., Skamnitckaya L. S., Savichev A. N., Koroteev D. V. 2012, *Kianitovye rudy Rossii* [Kyanite ores of Russia], Ekaterinburg, 334 p.
6. Rozanov K. I., Mineev D. A. 1973, *Geokhimicheskaya kharakteristika dokembriyskikh granitoidov Priazov'ya* [Geochemical characteristics of Precambrian granitoids of the Priazovye]. *Geokhimiya* [Geochemistry International], no. 2, pp. 238–249.
7. Bel'kov I. V. 1963, *Kianitovye slantsy svity Keyv* [Kyanite schists of the Keyv formation], Moscow, 136 p.
8. Bel'kov I. V. 1981, *Mineral'nye mestorozhdeniya Kol'skogo poluostrova* [Mineral deposits of the Kola peninsula], Leningrad, pp. 163–177.
9. Lutts B. G., Mineev D. A. 1967, *Redkie elementy v porodakh razlichnykh metamorficheskikh fatsiy* [Rare elements in the rocks of various metamorphic facies], Moscow, pp. 59–104.
10. Voytekhovskiy Yu. L. 2010, *Kianitovye slantsy B. Keyv – strategicheskii resurs Rossii. Problemy osvoeniya kianitovykh mestorozhdeniy Kol'skogo poluostrova, Karelii i Urala* [Kyanite schists of Keyv – Russia's strategic resource. Problems of development of kyanite deposits of the Kola peninsula, Karelia and the Urals], Apatity, pp. 3–21.
11. Kameneva E. E., Skamnitckaya L. S., Shchiptsov V. V., Bukchina O. V. 2003, *Osobennosti veshchestvennogo sostava i tekhnologicheskie svoystva kianitovykh rud Khizovaarskogo mestorozhdeniya* [Features of material composition and technological properties of kyanite ore deposits of Hizovaarsk deposit]. *Obogashchenie rud* [Ore dressing], no. 6, pp. 17–21.
12. Shchiptsov V. V., Skamnitckaya L. S., Bubnova T. P., Danilevskaya D. A. 2010, *Rol' geologicheskikh, mineralogicheskikh i tekhnologicheskikh issledovaniy Instituta geologii KarNTs RAN v otsenke potentsiala mineral'no-syr'evoy bazy Respubliki Kareliya. Sb. nauchn. tr. «Tekhnologicheskaya mineralogiya, metody pererabotki mineral'nogo syr'ya i novye materialy* [The role of the geological, mineralogical and technological researches of the Institute of Geology of Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences to assess the potential of the mineral resource base of the Republic of Karelia. Collection of scientific papers «Technological mineralogy, methods for recycling of mineral products and new materials], Petrozavodsk, pp. 37–55.

**Виктор Алексеевич Коротеев,**

Koroteev@igg.uran.ru

Институт геологии и геохимии УрО РАН  
Россия, Екатеринбург, ул. Вонсовского, 15

**Юрий Алексеевич Поленов,**

**Виталий Николаевич Огородников,**

**Александр Николаевич Савичев,**

Уральский государственный горный университет  
Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

**Viktor Alekseevich Koroteev,**

Koroteev@igg.uran.ru

The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural  
Branch of the Russian Academy of sciences  
Ekaterinburg, Russia

**Yuriy Alekseevich Polenov,**

**Vitaliy Nikolaevich Ogorodnikov,**

**Aleksandr Nikolaevich Savichev,**

Ural State Mining University  
Ekaterinburg, Russia