

Поведение редких металлов и редкоземельных элементов в кианитовых рудах Кольского полуострова и Урала

С докембрием связана значительная масса редкоземельных руд в пегматитах, щелочных, редкометальных гранитах и карбонатитах с высокими концентрациями редких и редкоземельных минералов (РЗМ). На верхний протерозой приходится главный докембрийский максимум РЗМ в крупных месторождениях различных типов, в том числе и кианитовых. В фанерозойских структурах аналогичные месторождения размещаются в докембрийских блоках в тесных пространственных и генетических связях с наиболее глубинными субмантийными расплавами субщелочных гранитоидов и карбонатитов. Эти ассоциации, как известно, структурно приурочены к зонам длительно развивающихся глубинных разломов рифтогенной природы, где широко развиты месторождения кианитовых кварцитов [Беляев и др., 1996; Огородников и др., 2007; Коротеев и др., 2010].

В настоящее время выделено две группы продуктивных метаморфогенно-метасоматических пород, обогащенных высокоглиноземистыми минералами: 1) стратифицированные горизонты в толще плагиогнейсов раннего архея и протерозоя, широко проявленные в Карелии и на Кольском п-ове (свита Кейв) – глиноземистая (кианитовая) формация щитов и древних платформ (метаморфогенный, кейвский тип) и 2) нестратифицированные метасоматические породы, слагающие внутренние и внешние шовные зоны гнейсовых блоков, полифациальных метаморфических комплексов андалузит-силлиманитового и кианит-силлиманитового термодинамических типов – глиноземистая формация складчатых поясов (гидротермально-метасоматический, уральский тип) [Коротеев и др., 2011; Огородников и др., 2012].

Для большинства зональных метаморфических комплексов Кольского полуострова, Карелии, Сибири кианит- и силлиманитсодержащие породы слагают определенные зоны метаморфизма и развиваются по постархейским пелитовым толщам.

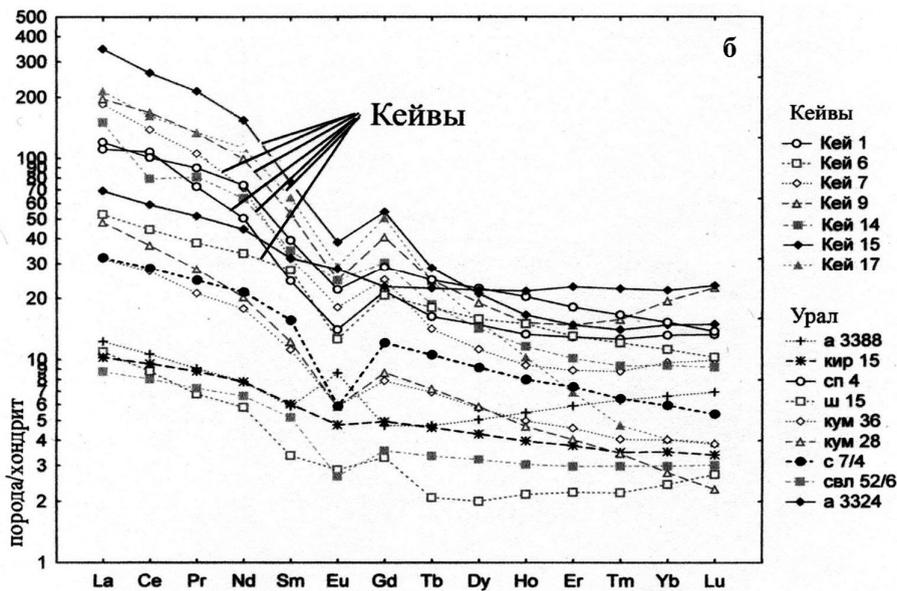
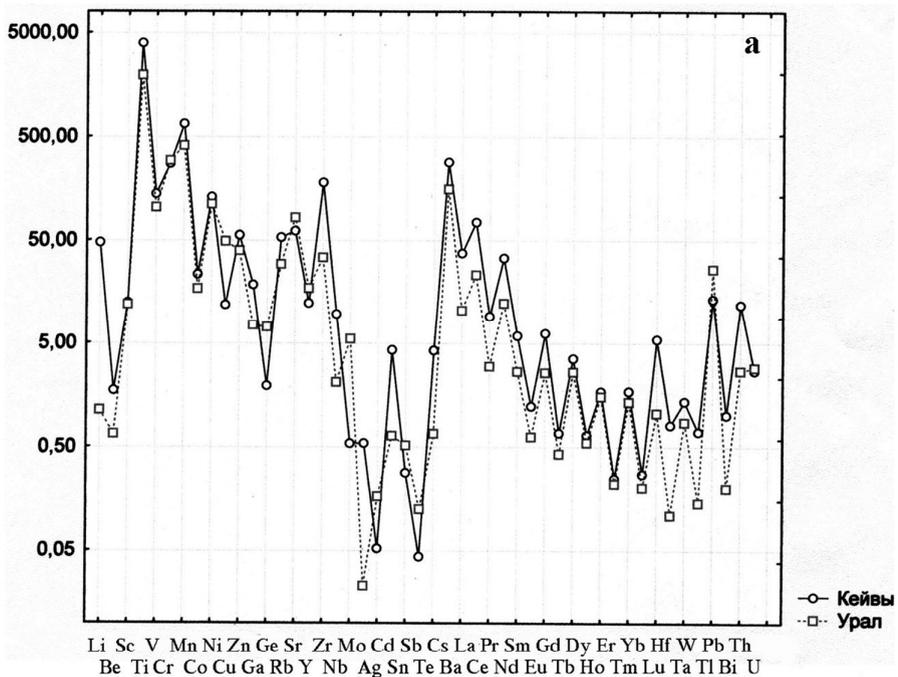


Рис. 1. Поведение средних содержаний элементов (а) и РЗЭ, нормированных к хондриту, (б) во вмещающих породах месторождений кианита Кейв и Урала

Зоны обогащения высокоглиноземистыми минералами приурочены к шовным зонам с активным проявлением метасоматоза и окварцевания, с образованием метаморфогенного, метаморфогенно-метасоматического и метасоматического типов оруденения. При изучении генезиса месторождений неметаллических полезных ископаемых чаще всего не анализируется поведение рудных, редкометалльных, редкоземельных, благородных и радиоактивных элементов. Эти элементы, находясь в виде изоморфных или механических примесей в этих минералах, характеризуют ультраметаморфические, магматические, постмагматические и гидротермальные процессы, которые происходили от докембрия до фанерозоя.

Т а б л и ц а

Статистические параметры содержаний редких, редкоземельных, благородных и радиоактивных элементов во вмещающих породах Кейв и Урала (г/т)

Элементы	Кейвы		Урал		Элементы	Кейвы		Урал	
	Хср	σ	Хср	σ		Хср	σ	Хср	σ
Li	47.98	50.08	1.14	1.22	Cs	4.27	3.98	0.67	1.05
Be	1.76	1.51	0.67	0.57	Ba	285.08	242.38	157.28	189.27
Sc	12.54	6.78	12.01	11.03	La	37.73	27.42	10.54	8.8
Ti	4008.62	3076.77	1961.28	2601.05	Ce	75.09	55.12	23.2	19.09
V	140.73	102.41	104.86	83.62	Pr	9.2	6.54	3.01	2.57
Cr	275.55	592.38	296.27	456.47	Nd	33.97	23.75	12.36	10.43
Mn	666.79	525.04	413	525.82	Sm	5.92	3.79	2.66	1.95
Co	23.51	30.01	17.12	27.61	Eu	1.24	0.62	0.62	0.51
Ni	132.02	290.48	112.16	167.01	Gd	6.27	3.53	2.6	1.88
Cu	11.93	7.55	49.26	64.76	Tb	0.68	0.31	0.43	0.31
Zn	56.29	31.23	40.05	48.24	Dv	3.58	1.46	2.65	1.95
Ga	18.59	9.16	7.51	6.96	Ho	0.65	0.25	0.55	0.42
Ge	1.93	1.11	7.24	6.77	Er	1.71	0.71	1.52	1.18
Rb	53.53	45.59	29.52	45.05	Tm	0.25	0.12	0.22	0.17
Sr	62.11	58.34	83.2	132.65	Yb	1.72	0.91	1.36	1.09
Y	12.32	4.49	17.28	17.85	Lu	0.27	0.16	0.21	0.17
Zr	181.5	225.98	34.37	31.22	Hf	5.48	6.47	1.06	0.94
Nb	9.86	6.75	2.1	2.27	Ta	0.82	0.62	0.11	0.19
Mo	0.54	0.49	5.53	7.4	W	1.37	1.87	0.86	0.75
Ag	0.54	0.32	0.02	0.02	Tl	0.7	0.71	0.14	0.16
Cd	0.05	0.05	0.17	0.24	Pb	13.62	10.96	26.49	46.4
Sn	4.32	3.14	0.64	0.58	Bi	1.01	1.98	0.2	0.21
Sb	0.28	0.33	0.52	1.05	Th	11.94	10.6	2.71	1.45
Te	0.04	0.04	0.13	0.08	U	2.71	2.53	2.92	1.41

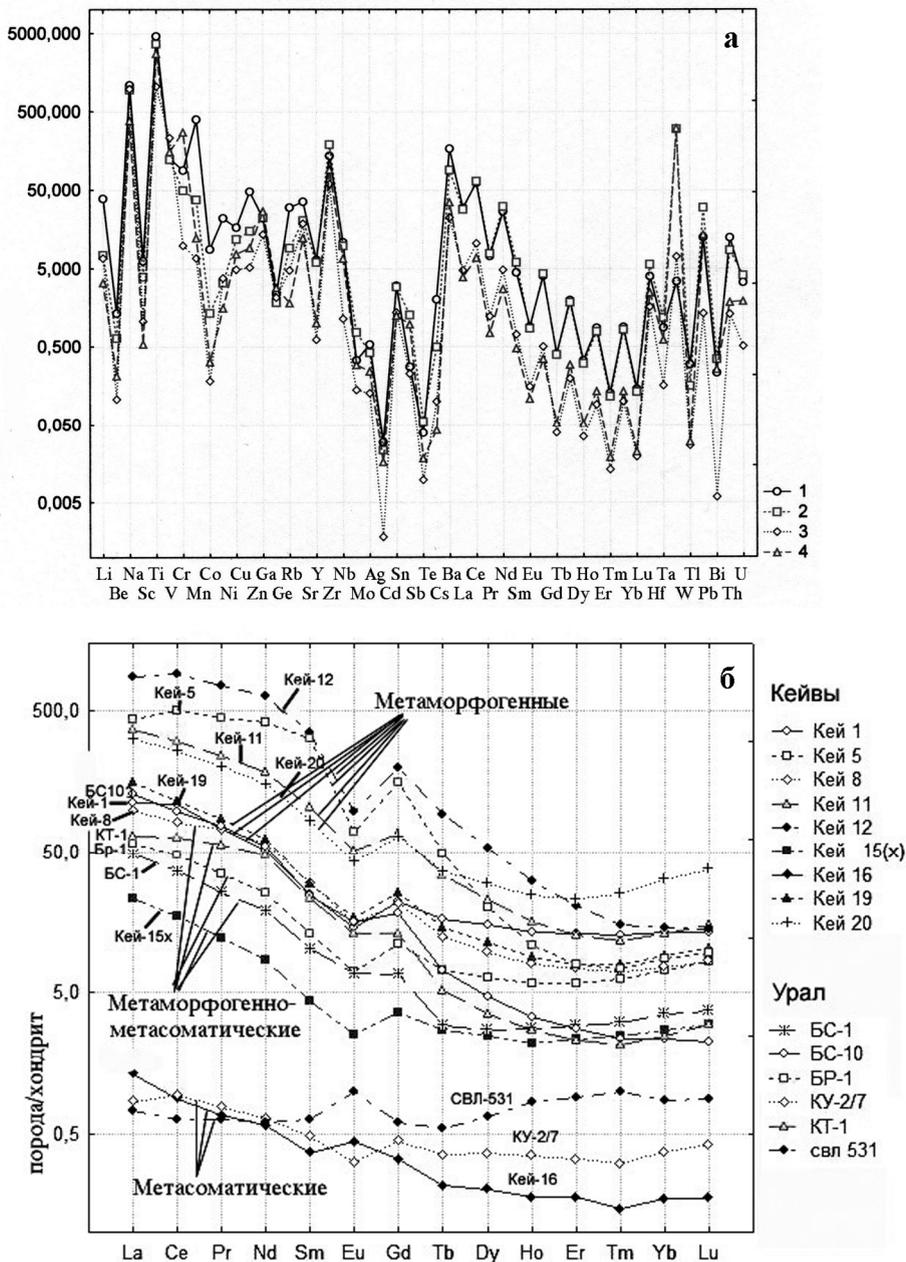


Рис. 2. Поведение среднестатистических содержаний (\bar{X}_{cp}) редких и редкоземельных элементов (1 – метаморфогенные, 2 – метасоматические, 3 – оторочки кварцевых жил, 4 – порфиробластические кианиты зон перекристаллизации) (а) и РЗЭ, нормированных к хондриту, (б) в кианитах разных морфогенетических типов Кейвы и Урала.

Большие Кейвы – уникальная провинция высокоглиноземистых кристаллических сланцев докембрия на Кольском полуострове [Бельков, 1963; Лутц, 1967; Войтеховский, 2010]. Уральские месторождения кианита размещаются в гнейсовых толщах докембрийского возраста и весьма схожи с месторождениями свиты Кейв, но уступают им по масштабам [Коротеев и др., 2011; Огородников и др., 2012].

Вмещающие породы кианитовых месторождений Кейв и Урала были проанализированы методом ICP MS на приборе ELAN 9000 DRC-е. Среднестатистические значения содержаний редких, редкоземельных, благородных и радиоактивных элементов приведены в таблице. Из таблицы видно, что вмещающие породы Кольского полуострова по Li, Be, Ti, Rb, Zr, Nb, Sn, Ba, La, TR (Ce-группы), Hf, Ta, Bi, Th количественно превосходят породы Урала. Сопоставление распределения РЗЭ в породах, вмещающих кианитовые месторождения кейвской серии и уральских месторождений, показало, что они имеют однотипную направленность, но в породах Кольского полуострова количество РЗЭ выше (рис. 1). Это обусловлено более масштабными процессами метаморфизма, ультраметаморфизма, широкого развития процессов щелочного магматизма и карбонатитов, создающих редкоземельную специализацию докембрия по отношению к фанерозою.

Выделенные разновидности кианитов были проанализированы методом ICP MS. Установлено, что наиболее высокие содержания РЭ и РЗЭ характерны для метаморфогенных руд и наибольший разброс значений характерен для редкоземельных элементов (рис. 2).

Факторный анализ, выполненный в программе STATISTICA-7 (метод главных компонент с варимаксным вращением) по всей совокупной выборке кианитов Кольского полуострова (кейвская серия) и Урала, показал, что наиболее значимый фактор-1 характеризует метаморфогенный тип кианитов, образующихся в докембрийских породах с широким развитием щелочных магматических плутонов, с которыми связана редкоземельная минерализация:

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, тонко-призматическими разновидностями:

Li, Be, Na, Sc, Mn, Co, Zn, Rb, Sr, Cs, Ba, Tl

Фактор-2 – 7.9

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

Cu, Zr, Nb, Ag, Sn, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, U

Фактор-3 – 7.32

Фактор-4 характеризует зоны переотложения сидерофильных элементов в зонах кислотного выщелачивания, интенсивной мусковитизации (фукситизации) и

перекристаллизации кианитов с образованием хорошо окристаллизованных, крупно-порфиробластовых кристаллов кианита, большим количеством включений гематита и игольчатого рутила, от которых сложно избавиться при обогащении:

Ti, V, Cr, Mn, Co, Ga, Ge

Фактор-4 – 3.8

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

Mo, Bi, Te

Фактор-5 – 2.64

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

Результаты химических анализов говорят о том, что в конкреционной кианитовой руде содержание РЗЭ может варьировать от 0.04 до 0.18 %. В пересчете на прогнозные ресурсы кианитовых руд до глубины 100 м это дает 11.7 млн т.

Содержание Sc, Zr, Hf, Th в кианитовой руде метаморфогенно-метасоматического типа составляет в сумме 0.23–0.25 %, что позволяет оценить их ресурсы в кейвских сланцах в 27–29 млн т. и рассматривать их как новую потенциальную базу редких элементов. Дальнейшие исследования позволят определить минеральные фазы и оценить реальный выход редких элементов при комплексном обогащении кианитовой руды [Войтеховский, 2010].

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований № 14-23-24-27 Президиума РАН и Интеграционного проекта «Развитие минерально-сырьевой базы России», руководитель проекта академик РАН В. А. Коротеев. Частичное финансирование осуществлялось по госбюджетной теме 5.4667.2011(Г-3 УГГУ) «Исследование генетических типов месторождений группы кианита», руководитель профессор В. Н. Огородников.

Литература

- Бельков И. В.* Кианитовые сланцы свиты Кейв. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 136 с.
- Беляев К. Д., Ганеев И. Г., Чайка В. И., Чернов В. Д.* Рудные ресурсы и их размещение по геозонам. Редкие металлы: тантал, ниобий, скандий, редкие земли, цирконий, гафний. Справочное пособие. М.: Недра, 1996. 176 с.
- Войтеховский Ю. Л.* Кианитовые сланцы Б. Кейв – стратегический ресурс России // Проблемы освоения кианитовых месторождений Кольского полуострова, Карелии и Урала. Апатиты, ГИ КНЦ РАН, 2010.
- Каменева Е. Е., Скамницкая Л. С., Щитцов В. В., Бужчина О. В.* Особенности вещественного состава и технологические свойства кианитовых руд Хизоваарского месторождения // Обогащение руд, 2003. № 6. С. 17–21.
- Коротеев В. А., Огородников В. Н., Сазонов В. Н., Поленов Ю. А.* Минерагеня шовных зон Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 416 с.
- Коротеев В. А., Огородников В. Н., Войтеховский Ю. Л. и др.* Небокситовое алюминиевое сырье России. Екатеринбург: УрО РАН, 2011, 227 с.
- 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.

Огородников В. Н., Сазонов В. Н., Поленов Ю. А. Минерагения шовных зон Урала. Уфалейский гнейсово-амфиболитовый комплекс (Южный Урал). Екатеринбург: Изд-во ИГГ УрО РАН-УГГУ, 2007. 187 с.

Огородников В. Н., Коротеев В. А., Войтеховский Ю. Л. и др. Кианитовые руды России. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 334 с.

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 // Сб. научн. тр. «Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы. Петрозаводск, 2010. С. 37-55