

УДК 549.514.51 (470.22)

РЕДКИЕ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В КВАРЦЕ КАК ИНДИКАТОРЫ УСЛОВИЙ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

Е. Н. Светова, С. А. Светов, Л. А. Данилевская

Институт геологии Карельского научного центра РАН

В статье приводятся результаты прецизионного изучения распределения редких и редкоземельных элементов в кварце различного генезиса: магматическом, постмагматическом, гидротермальном, хемогенном, терригенно-метаморфогенном, пегматитовом. Выявлены существенные различия в геохимической характеристике кварца, установлены основные его геохимические (РЭ и РЗЭ) классификационные типы, коррелирующие с условиями минералообразования.

К л ю ч е в ы е с л о в а : кварц, редкие и редкоземельные элементы, LA-ICP-MS.

E. N. Svetova, S. A. Svetov, L. A. Danilevskaya. RARE AND RARE EARTH ELEMENTS IN QUARTZ AS INDICATORS OF MINEROGENESIS

The article presents the results of precision study of the distribution of rare and rare earth elements in various quartz types: magmatic, post-magmatic, hydrothermal, chemogenic, terrigenic-metamorphogenic, pegmatitic. Significant differences in quartz geochemical characteristics were detected, and the main geochemical types of quartz, which correlate with the minerogenesis conditions, were classified (by RE and REE).

Key words : quartz, rare and rare earth elements, LA-ICP-MS.

Введение

Кварц, являясь сквозным минералом земной коры, входит в состав большинства магматических, осадочных и метаморфических пород и гидротермальных ассоциаций. Широкая распространенность кварца, его уникальная полигенность и полихронность, чувствительность к изменению условий кристаллизации обусловили возможность использования данного минерала в качестве модельного объекта для решения большого круга минералогических и геологических проблем, таких как типоморфизм и генетическая информативность минералов, геохимическая характеристика процессов гидротермального рудообразования, магнообразования и многих других

[Павлишин, 1983; Юргенсон, 1984; Раков, 2007; Лютоев, 2008 и др.]. Важное значение в таких исследованиях имеют сведения о составе и содержании всегда присутствующих в кварце элементов-примесей, как изоморфно входящих в кристаллическую решетку кварца, так и рассеянных, связанных с наличием субмикроскопических минеральных и флюидных включений. Материалами геохимических исследований кварца различных геологических образований показана правомерность использования геохимии рассеянных примесей в кварце в практике поисков золотого оруденения [Новгородова и др., 1984; Томиленко и др., 2008; Cao et al., 2010 и др.], при изучении вопросов, связанных с происхождением гранитоидов [Ляхович, 1991], установлена инди-

каторная роль элементов-примесей в кварце при реконструкции условий формирования разновозрастных магматических формаций и их эволюции в результате наложенных процессов [Гурбанов и др., 1999].

В настоящей работе приводятся новые данные о содержании редких и редкоземельных элементов-примесей в жильном и породообразующем кварце, позволившие выявить его геохимическую спецификацию на примере мезоархейских и палеопротерозойских породных комплексов Карело-Кольского региона.

Материал и методы

Основу исследования составили известные и геолого-петрологически изученные объекты, отражающие различные условия формирования породных парагенезов и, в частности, кварца, присутствующего в этих породных литотипах. Изучалась авторская коллекция, включающая генетически контрастные разновидности кварца: магматический и постмагматический, осадочно-хемогенный, гидротермальный, пегматитовый и терригенно-метаморфический.

Для характеристики *магматического* (первично магматического) кварца использованы пробы массивных андезитовых лав («кварцевых порфиоров») сумийского возраста (Лехтинская структура, обр. Qp-26) и порфириковых субвулканических дацитов лопия (адакитовый нект Игноильской структуры, обр. Qp-25) [Светов, 2009]. В данных вулканических породах кварц формирует порфириковые вкрапленники размером до 4–5 мм и является равновесной первично магматической фазой. Петрографическое изучение кварца показало отсутствие в нем минеральных включений и однородную внутреннюю структуру.

Постмагматический кварц изучен на примере кварцевых миндалин из массивных лавовых потоков андезибазальтов сумийского возраста Эльмусской, Кумсинской и Семченской структур (обр. Qp-1, Qp-2, Qp-3). Миндалины представляют собой округлые образования (от 1–2 до 50 см в диаметре) в кровельных частях потока, имеют «слоистую» структуру. Сложены миндалины преимущественно кварцем (90 %), в незначительном количестве присутствуют серицит, хлорит.

Изучение *осадочно-хемогенного* кварца реализовано на примере мезоархейских силицитов – кремнистых образований, широко развитых среди вулканогенно-осадочных фаций древнейшей островодужной и океанической ассоциации Ведлозерско-Сегозерского

зеленокаменного пояса в пределах Койкарской (обр. Qp-23) и Эльмусской структур (обр. Qp-19, Qp-24). Формирование силицитов связано с поступлением кремнезема из вулканических очагов или высвобождением его из вулканических пород при поствулканических процессах. Характерным диагностическим признаком силицитов является их афанитовый облик, выделяются слоистые, однородные массивные, сливные и конкреционные разности, между которыми существуют взаимопереходы [Рыбаков, Светова, 1975; Светова, 1988]. Породы имеют светло-серую, зеленовато-серую, реже красноватую окраску, обусловленную примесью тонкорассеянного органического вещества, соединений железа. В минеральном составе силицитов преобладает тонкозернистый халцедон (частично перекристаллизованный в ходе регионального метаморфизма в кварц, слагает породу на 75–80 %), в виде примесей и отдельных метаморфических включений присутствуют серицит, альбит, калиевый полевой шпат, биотит, мусковит. В качестве акцессорных минералов выявлено небольшое количество зерен терригенного циркона (чаще всего осколков зерен, имеющих деформированные, окатанные, корродированные формы), а также редкие минеральные индивиды группы фергюсонита-самарскита (ниобаты).

Гидротермальный кварц в коллекции представлен пробами различных типов кварца кварцево-жильных проявлений и месторождений Карело-Кольской кварценозной провинции. Изучен молочно-белый катаклазированный кварц месторождения Фенькина-Лампи, образованный в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма и претерпевший кристаллизационные изменения с понижением температур. Проанализированный первичный кварц (обр. Ф-32) характеризуется повышенной газонасыщенностью, фрагментарной, мозаичной микроструктурой и наличием сети мелких прожилков с вторичным мелкозернистым, грануломорфным прозрачным кварцем и кристаллами в полостях. Частично гранулированный полупрозрачный кварц (обр. 636) из линзовидной жилы, локализованной в кварц-мусковитовых сланцах пачки В [Бельков, 1963] Хребта Серповидного (Большие Кейвы), сформирован в условиях эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма и характеризуется гетеробластовой структурой с проявлением собирательной рекристаллизации, низкой газонасыщенностью. Изучен также жильный серовато-белый полупрозрачный кварц с гранобластовой равновесной структурой (близкий к гранулированному) из небольшой субсогласной кварцевой жилы в слюди-

стых сланцах района Юханкоски (обр. Ю-2, Приладожье). Кроме того, исследован молочно-белый кварц из поздних гидротермальных жил Эльмусской (Qp-20) и Койкарской структур (Qp-22), имеющих золоторудную специализацию [Иващенко, Голубев, 2011].

Характеристика *пегматитового* кварца основана на изучении молочно-белого кварца месторождения мусковитовых пегматитов Риколатва, отобранного из отвалов шахт (обр. РКЛ-1). Это типичный кварц для данного типа месторождений Беломорской пегматитовой провинции, слагающий блоковые участки ядерных частей жил. Для кварца характерны молочно-белая окраска, обусловленная повышенной газонасыщенностью, и проявление перекристаллизации с укрупнением зерен. Пластические деформации наблюдаются в виде факелов и пластинок деформации, облачного, прерывистого погасания одновременно с блокированием.

В качестве дополнительных объектов для сопоставления нами были изучены пробы кварца *терригенно-метаморфического* происхождения из: суперзрелых палеопротерозойских кварцитов Шокшинской структуры (обр. Q-18); серых плотных кварцитов месторождения Рижгубское (Кольский п-ов), входящих в состав туфогенно-осадочной толщи имандраварзугской серии мезопротерозоя, образованных в условиях неглубокого бассейна и метаморфизованных в условиях низкотемпературной хлорит-актинолитовой фации метаморфизма (обр. РЖ-3); темно-серых плотных ятулийских кварцитов п-ова Питкяниеми (Малое Янисъярви, Северное Приладожье, обр. ПТ-15), сформированных в условиях начальных стадий метаморфизма зеленосланцевой фации.

Исследования включали несколько этапов. На предварительной стадии использовался комплекс методов минералого-литологического и петрографического исследования, позволивший уточнить и дополнить геологическую и генетическую характеристику исходных объектов. Для контроля фазовой чистоты некоторые образцы кварца проанализированы рентгенофазовым методом. Далее выполнялись аналитические работы, основанные на прецизионном изучении содержания редких и редкоземельных элементов в кварце методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в сочетании с лазерной абляцией проб (LA-ICP-MS). Микроэлементный состав кварца изучен на квадрупольном масс-спектрометре X-SERIES-2 фирмы Terhmo scientific с приставкой лазерной абляции UP-266 Macro

фирмы New Wave research (лазер Nd:YAG, длина волны излучения 266 нм, энергия импульса – 0,133 мДж, скорость сканирования – 70 мкм/с, частота повторения импульса 10 Гц, диаметр пятна абляции – 515 мкм). Расчет концентрации элементов производился методом внешней калибровки с использованием стандартного образца NIST 612. В ходе анализа выполнялось определение 42 рассеянных элементов: Li, Be, Sc, Ti, V, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ag, In, Sn, Sb, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Au, Th, U. Погрешность определения концентраций большинства элементов не превышала 15 %.

Пробоподготовка включала изготовление пластинок из образцов кварца размером до 1×1 см, для эксперимента выбирались участки кварца, имеющие максимально гомогенное строение с минимальным количеством минеральных включений. Для очистки возможного лабораторного загрязнения поверхности исследуемого образца в ходе предварительных исследований верхняя часть пробы испарялась холостым проходом лазера без проведения измерений (с идентичными параметрами его работы).

Для получения статистически достоверных результатов измерение концентраций элементов проводилось по профилю в пяти точках каждой пробы. По результатам исследования была сформирована база данных, включающая более 100 прецизионных определений.

Обсуждение результатов

По данным прецизионного LA-ICP-MS анализа кварц всех изучаемых генетических групп содержит широкий набор элементов-примесей (табл.). Отмечаются существенные вариации концентрации отдельных элементов в разных генетических типах кварца. Наиболее значимые отличия в концентрациях выявлены для флюид-мобильных элементов (Be, Li, As), транзитных (Cu), высокозарядных (Sc, Y, Zr, Nb, Ti) и крупноионных литофильных элементов (Rb, Ba, Sr), что, несомненно, связано с условиями кристаллизации кварцевой фазы.

На спайдерграммах содержания элементов-примесей в исследуемых пробах кварца, нормированных к составу верхней континентальной коры [McLennan, 2001], видны значительные отличия как в топологии трендов (уровне концентрации редких, редкоземельных элементов), так и в характере наблюдаемых аномалий (рис. 1).

Содержание редких и редкоземельных элементов в породообразующем и жильном кварце по данным LA-ICP-MS анализа, ppm

Элемент	Магматический		Постмагматический			Осадочно-хемогенный			Терригенно-метаморфогенный			Гидротермальный					Пегматовый PKJ-1
	Qp-26	Qp-25	Qp-3	Qp-1	Qp-2	Qp-24	Qp-23	Qp-19	Qp-18	PT-15	RЖ-3	636	Ю-2	Ф-32	Qp-22	Qp-20	
Li	12,3	5,75	3,78	5,54	6,32	5,59	5,95	4,35	6,43	6,03	5,12	46,5	31,9	10,4	0,89	1,06	64,9
Be	3,54	1,73	0,10	0,10	0,17	1,86	1,56	1,21	0,32	0,67	0,23	0,03	0,06	0,02	0,02	0,00	0,20
Sc	23,4	17,1	31,3	32,7	30,3	17,9	18,6	12,3	23,8	23,3	18,6	20,8	23,2	81,1	22,8	14,2	52,8
Ti	52,4	51,7	45,0	66,2	73,6	20,6	410,1	18,6	37,1	230	100	6,1	9,9	9,1	1,5	1,9	6,9
V	9,6	3,3	0,1	0,6	3,9	0,5	0,6	0,4	3,7	74,7	18,8	1,9	2,2	3,6	1,1	0,2	2,4
Co	1,27	1,38	0,22	0,26	0,39	0,07	0,44	0,05	0,89	1,84	3,33	0,15	0,30	0,27	0,08	0,15	0,16
Ni	9,54	7,62	7,98	9,18	9,42	3,86	5,34	3,40	14,0	14,9	13,1	10,9	20,1	30,0	12,4	8,18	22,0
Cu	1,50	1,13	12,7	13,8	13,66	0,31	1,19	0,75	3,23	28,4	5,00	3,20	11,9	17,5	1,58	0,43	7,69
Zn	15,2	5,47	2,00	3,63	3,42	10,7	5,29	7,98	7,32	75,7	18,6	4,04	18,6	15,8	1,14	0,76	13,0
Ga	13,5	15,4	0,22	3,07	0,92	16,6	12,1	13,2	2,69	5,39	3,06	0,33	0,27	0,68	0,04	0,04	0,27
Ge	1,08	1,18	0,57	4,98	3,71	1,12	1,49	0,92	0,80	1,24	1,09	0,63	1,21	0,89	0,28	0,17	2,01
As	0,18	1,25	2,90	3,29	4,07	1,36	1,30	0,62	0,54	1,66	1,22	0,36	1,44	8,66	0,24	0,17	3,63
Rb	162	19,4	0,92	1,00	13,2	71,1	91,2	84,9	18,5	12,5	15,9	0,89	1,00	1,63	0,33	0,14	1,10
Sr	39,3	200	0,88	0,95	0,50	35,7	16,7	20,5	5,59	24,9	33,8	1,51	1,83	11,7	3,63	3,91	1,92
Y	12,8	7,96	0,04	0,12	0,19	28,5	80,5	20,2	1,97	32,8	6,22	0,19	0,16	0,25	0,08	0,04	0,09
Zr	108	60,8	0,13	0,27	0,58	99	340	100	54,4	288	26,7	0,60	1,35	1,45	0,11	0,07	0,67
Nb	10,9	8,26	0,05	0,08	0,52	19,7	34,2	7,59	0,47	5,09	1,57	0,20	0,20	0,32	0,01	0,02	0,16
Ag	0,04	0,04	0,52	0,58	0,72	0,04	0,07	0,03	0,04	0,15	0,23	0,03	0,06	0,17	0,03	0,03	0,10
In	0,03	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,00
Sn	2,89	1,04	1,22	1,45	1,15	1,60	1,15	0,80	0,24	1,78	1,17	0,63	2,25	2,21	0,08	0,07	0,91
Sb	0,03	0,10	0,03	0,21	0,06	0,77	1,19	0,48	0,10	0,29	0,31	0,15	0,21	0,37	0,03	0,11	0,11
Ba	580	340	1,99	0,39	21,4	217	729	260	201	294	61,9	2,36	3,14	21,0	7,19	0,56	1,95
La	10,6	4,06	0,06	0,22	0,12	0,94	38,3	0,43	1,47	2,62	9,01	0,73	0,68	1,06	0,04	0,01	0,67
Ce	14,7	7,40	0,03	0,22	0,15	3,45	85,1	1,71	4,41	6,38	18,4	0,62	0,66	0,96	0,12	0,02	0,32
Pr	1,50	1,07	0,02	0,03	0,02	0,47	11,1	0,21	0,40	1,19	2,33	0,14	0,07	0,12	0,01	0,01	0,06
Nd	5,63	3,92	0,03	0,14	0,09	2,01	44,9	0,92	1,34	6,14	8,91	0,28	0,26	0,34	0,03	0,01	0,22
Sm	1,12	0,75	0,002	0,05	0,01	1,41	10,3	0,60	0,22	2,34	1,73	0,10	0,03	0,05	0,01	0,003	0,02
Eu	0,95	0,64	0,01	0,01	0,01	0,45	1,40	0,36	0,18	0,66	0,43	0,04	0,02	0,05	0,02	0,004	0,01
Gd	1,44	0,75	0,01	0,02	0,04	2,92	12,5	1,24	0,25	4,11	1,65	0,05	0,04	0,09	0,02	0,01	0,02
Tb	0,25	0,13	0,002	0,003	0,003	0,74	1,71	0,37	0,04	0,71	0,23	0,013	0,005	0,006	0,001	0,001	0,006
Dy	1,64	0,96	0,004	0,026	0,038	5,13	11,6	2,79	0,33	5,01	1,16	0,052	0,023	0,035	0,005	0,002	0,019
Ho	0,44	0,25	0,004	0,003	0,009	1,10	2,61	0,0	0,07	1,02	0,22	0,005	0,004	0,010	0,001	0,001	0,002
Er	1,40	0,85	0,004	0,004	0,022	3,04	8,71	2,29	0,23	2,54	0,63	0,016	0,007	0,018	0,006	0,001	0,009
Tm	0,25	0,16	0,001	0,004	0,006	0,44	1,44	0,41	0,04	0,35	0,11	0,004	0,002	0,002	0,001	0,000	0,001
Yb	1,80	1,10	0,002	0,006	0,016	2,88	10,5	2,89	0,34	2,18	1,09	0,020	0,008	0,017	0,006	0,001	0,006
Lu	0,29	0,13	0,000	0,002	0,003	0,40	1,61	0,45	0,05	0,31	0,11	0,004	0,001	0,002	0,000	0,001	0,001
Hf	4,37	2,77	0,003	0,011	0,020	5,56	13,5	5,19	1,57	8,73	0,73	0,02	0,04	0,05	0,001	0,002	0,01
Ta	2,86	1,43	0,007	0,004	0,021	2,85	5,47	2,26	0,61	0,95	0,22	0,02	0,02	0,03	0,002	0,001	0,01
Th	6,09	11,6	0,02	0,15	0,12	13,6	24,1	4,19	1,44	18,7	2,61	0,14	0,09	0,26	0,008	0,005	0,13
U	0,76	3,28	0,01	0,07	0,21	1,30	3,00	1,09	0,36	3,15	1,07	0,06	0,04	0,21	0,003	0,022	0,06
Ce/Ce*	0,79	0,85	0,23	0,57	0,72	1,26	1,00	1,38	1,38	0,88	0,96	0,44	0,59	0,54	1,3	0,77	0,30

Примечание. Анализ выполнен методом LA-ICP-MS в Институте геологии КарНЦ РАН (аналитик А. С. Парамонов). Значения концентраций элементов усреднены по данным пяти измерений для каждой пробы.

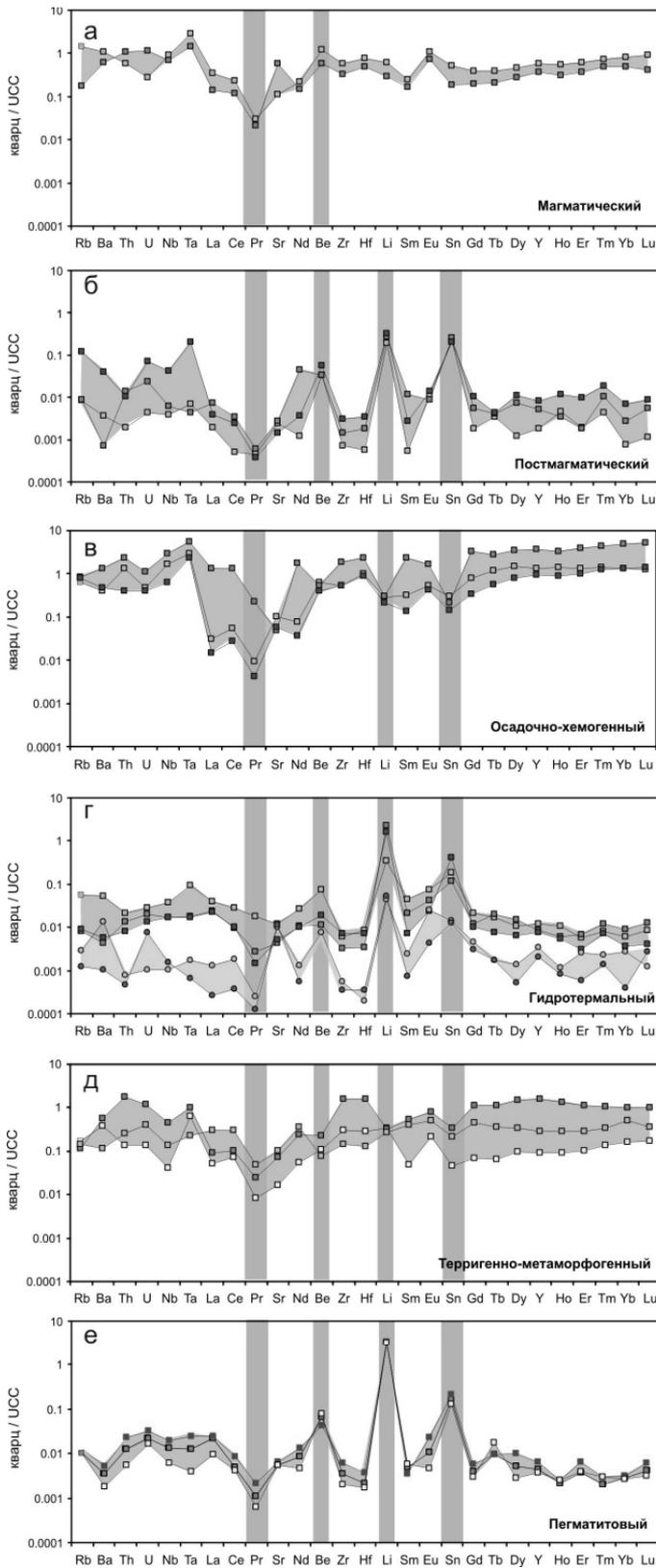


Рис. 1. Нормированные к верхней континентальной коре [McLennan, 2001] концентрации элементов примесей в генетически различных типах кварца

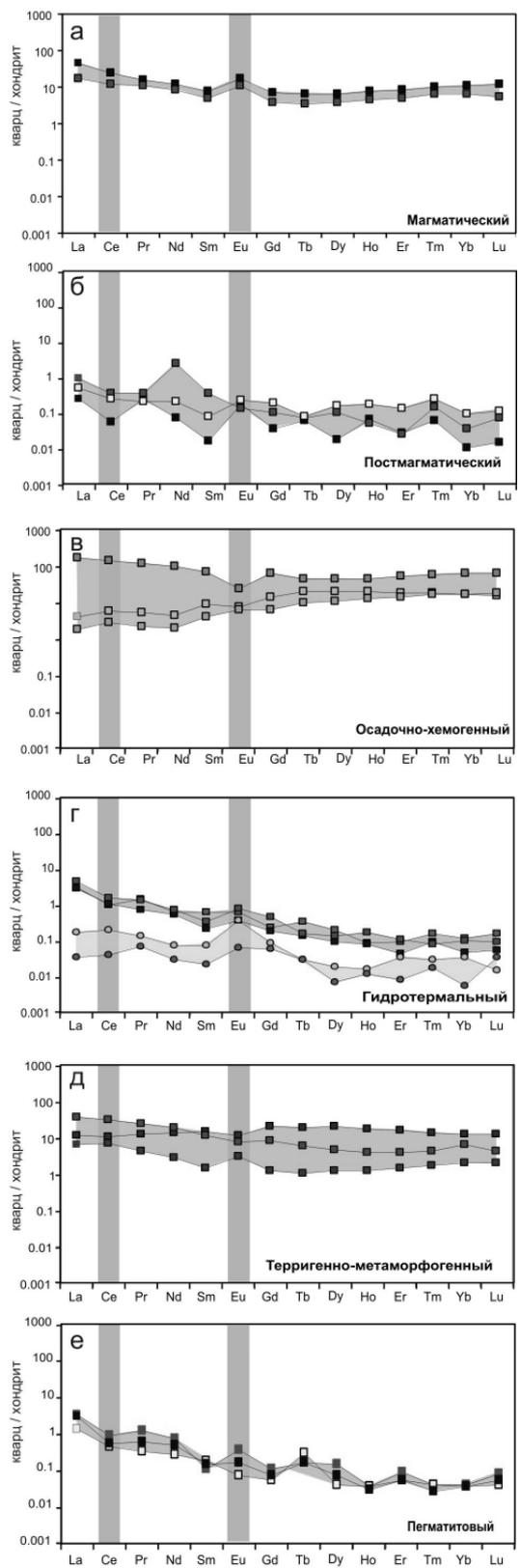


Рис. 2. Нормированные на хондрит [Sun, McDonough 1989] спектры распределения РЗЭ в генетически различных типах кварца

Рассмотрим особенности основных типов кварца с учетом характеристических элементных концентраций и величины цериевой аномалии Ce/Ce^* , где Ce – нормированное на хондрит содержание Ce , Ce^* – среднее значение между нормированными на хондрит концентрациями La и Pr .

Магматический кварц. Содержит минимальное количество примесных минеральных включений (<1 %). Для кварца характерны высокие концентрации Ba (340–580 ppm), Zr (60–108 ppm), Sr , Th , Ta , Hf . На спайдерграммах проявлены отчетливый минимум по Pr и максимумы по Ta , Be и Eu (рис. 1, а). Содержание РЭ и РЗЭ в магматическом кварце находится на уровне состава верхней континентальной коры. Нормированное на хондрит распределение РЗЭ в магматическом кварце является слабофракционированным, отмечается обогащенность легкими РЗЭ и выраженная европиевая аномалия, уровень содержания РЗЭ превышает хондритовый на порядок (рис. 2, а). Величина цериевой аномалии Ce/Ce^* для проб магматического кварца составляет 0,79–0,85, что сопоставимо с характеристикой вмещающих пород, испытавших незначительные метаморфические преобразования.

Постмагматический кварц. Содержит незначительную примесь серицита, хлорита (до 10 %). Для данного типа кварца характерны низкие концентрации Ba (0,4–21 ppm), Nb (<1 ppm) и всех РЗЭ. Содержание РЭ и РЗЭ значительно ниже их концентраций в верхней континентальной коре. Спектры имеют отчетливые минимумы по Ba , Th , Pr , Sm , Yb и максимумы по Be , Li , Sn (рис. 1, б). Нормированное к хондриту распределение РЗЭ в постмагматическом кварце является фракционированным, отмечается незначительная обогащенность легкими РЗЭ, присутствует слабопроявленная положительная европиевая аномалия (рис. 2, б). Уровень содержания РЗЭ в постмагматическом кварце на один-два порядка ниже уровня хондрита. Величина цериевой аномалии Ce/Ce^* составляет 0,23–0,72, что свидетельствует об обедненности постмагматической системы примесными элементами.

Осадочно-хемогенный кварц. Содержит такие примесные минеральные фазы, как серицит, альбит, калиевый полевой шпат, биотит, мусковит (около 20 %). На спайдерграммах силицитов отчетливо фиксируются минимумы по Pr , Li , Sn (рис. 1, в). Содержание РЭ и РЗЭ в хемогенном кварце соответствует или несколько ниже состава верхней континентальной коры. Отдельные пробы отличаются аномально высокими концентрациями Zr (до 340 ppm), что свя-

зано с присутствием терригенного циркона в аксессуарной фазе силицитов. Нормированное на хондрит распределение РЗЭ в силицитах является слабофракционированным, отмечается как слабая обогащенность (обр. Qp-23), так и обедненность легкими РЗЭ (обр. Qp-19, Q-24), общий уровень содержания РЗЭ выше хондритового на один-два порядка (рис. 2, в). Величина цериевой аномалии Ce/Ce^* варьирует от 1 до 1,38, что согласуется с данными по силицитам в целом.

Гидротермальный кварц. По распределению элементов-примесей близок характеристике постмагматического кварца. Отличается низкими концентрациями примесных минеральных фаз. На спайдерграммах отчетливо выделяются 2 группы кварца, отличающиеся уровнем содержания рассеянных элементов, но имеющие близкую топологию спектра (рис. 1, г). В группу кварца с более высоким содержанием рассеянных элементов объединены кварцевые пробы безрудных жил (обр. Ф-32, 636, Ю-2). В кварце гидротермальных жил, связанных с золоторудной минерализацией (обр. Qp-20, Qp-22), содержание рассеянных элементов-примесей на порядок меньше. Подобная закономерность отмечалась и другими авторами, в частности, при изучении РЗЭ в кварце золоторудного месторождения Shihu (Северный Китай) [Cao et al., 2010]. Для спектров распределения рассеянных элементов в рудном и безрудном кварце характерны общие положительные аномалии по Be , Li , Sn и отчетливые минимумы по Pr , Zr , Hf , Sm , что является типичным для жильного кварца некоторых других объектов, например, позднедевонских гидротермальных жил провинции Twin Hills (Северо-Восточная Австралия) [Uysal et al., 2011]. Уровень содержания РЭ и РЗЭ в гидротермальном кварце на один – три порядка ниже, чем в верхней континентальной коре. Распределение РЗЭ, нормированных к хондриту в гидротермальном кварце, является слабофракционированным, отмечаются обогащенность легкими РЗЭ и слабо выраженная положительная европиевая аномалия, общий уровень содержания РЗЭ близок к хондритовому или несколько ниже (рис. 2, г). Значение цериевой аномалии Ce/Ce^* в изученных пробах гидротермального кварца максимально варьирует от 0,4 до 1,3.

Терригенно-метаморфогенный кварц. На спайдерграммах терригенно-метаморфогенного кварца проявлены отчетливые минимумы по Pr , Be , Sn и максимумы по Ba , Ta , Zr , Hf (рис. 1, д). Содержание РЭ и РЗЭ находится чуть ниже уровня состава верхней континентальной коры.

Распределение РЗЭ, нормированных к хондриту в терригенно-метаморфогенном кварце, не фракционировано (рис. 2, д), общий уровень содержания РЗЭ превышает хондритовый на порядок. Значение Se/Se^* для кварца и кварцитов идентично и составляет 0,88–1,38.

Пегматитовый кварц. На спайдерграммах отчетливо проявлены положительные аномалии Be, Li, Sn и отрицательные Ba, Pr, Zr, Hf, Sm, что подобно спектрам, описывающим распределение элементов-примесей в гидротермальном и постмагматическом кварце (рис. 1, е). По уровню содержания РЭ и РЗЭ пегматитовый кварц также близок к гидротермальному и постмагматическому. Нормированное на хондрит распределение РЗЭ в пегматитовом кварце является слабофракционированным, отмечается обогащенность легкими РЗЭ (рис. 2, е). Общий уровень содержания РЗЭ несколько ниже хондритового. Величина цериевой аномалии составляет 0,3, что свидетельствует о значительном обеднении системы и возможном выносе рассеянных элементов.

Приведенные данные свидетельствуют о существовании вполне определенных отличий в геохимических особенностях кварца, что непосредственно коррелирует с составом и количеством ультрамелких примесных минеральных фаз в кварце и отражает специфические условия кристаллизации.

Выводы

Таким образом, по результатам LA-ICP-MS анализа пороодообразующего и жильного кварца выявлены основные закономерности в распределении редких и редкоземельных элементов в генетически контрастных кварцевых разновидностях. На примере исследуемой коллекции можно выделить три характеристические геохимические группы кварца, отличающиеся как по степени обогащенности редкими и редкоземельными элементами, так и по характеру соотношений их концентраций. Первая группа представлена магматическим кварцем, вторая объединяет гидротермальный, постмагматический и пегматитовый кварц, третью группу образует кварц хемогенного и терригенно-метаморфогенного происхождения. Выявленная геохимическая спецификация кварца связана с наличием в нем ультрамелких минеральных твердых и флюидных включений, отражающих «геохимический фон» определенной минералообразующей среды. Показано, что наиболее чистым (по содержанию минеральных включений) и геохимически более «стерильным» является кварц гидротермальных

жил, пегматитов и кварц, сформированный на постмагматической стадии вулканической деятельности, что обусловлено обедненностью гидротермальных и постмагматических систем высокозарядными и редкоземельными элементами.

Установлены различия в геохимическом характере кварца гидротермальных жил, имеющих золоторудную специализацию, и кварца безрудных объектов, которые проявляются в контрастных уровнях концентрации редких и редкоземельных элементов, что может стать важным маркером золоторудной минерализации при гидротермальных процессах. Однако для более убедительных и корректных выводов об индикаторной роли рассеянных элементов необходимо проведение детальных исследований.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что данные о содержании и распределении рассеянных элементов в кварце могут быть использованы в качестве геохимического маркера при реконструкции условий минералообразования в магматических, метаморфических и гидротермальных системах, а также использоваться в ходе литологического изучения терригенно-осадочных породных комплексов при анализе источников поступления обломочного материала.

Литература

- Бельков И. В. Кианитовые сланцы свиты Кейв. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1963. 320 с.
- Гурбанов А. Г., Чернуха Ф. П., Кошуг Д. Г. и др. ЭПР спектроскопия и геохимия пороодообразующего кварца из пород разновозрастных магматических формаций Большого Кавказа как индикатор наложенных процессов // Геохимия. 1999. № 6. С. 589–604.
- Иващенко В. И., Голубев А. И. Золото и платина Карелии: формационно-генетические типы оруденения и перспективы. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2011. 369 с.
- Лютюев В. П. Генетическое и материаловедческое значение структурных дефектов в кристаллозернистом кварце // Минералы и минералообразование, структура, разнообразие и эволюция минерального мира, роль минералов в происхождении и развитии жизни, биоминеральные взаимодействия. Сыктывкар: Геопринт, 2008. С. 124–189.
- Ляхович Т. Т. Геохимические особенности кварца гранитоидов корового и мантийного происхождения // Геохимия. 1991. № 2. С. 288–291.
- Новгородова М. И., Веретенников В. М., Боярская Р. В., Дрынкин В. И. Геохимия элементов-примесей в золотоносном кварце // Геохимия. 1984. № 3. С. 370–383.
- Павлишин В. И. Типоморфизм кварца, слюд и полевых шпатов в эндогенных образованиях. Киев: Наукова Думка, 1983. 233 с.

Раков Л. Т. Научные основы применения структурных дефектов в кварце в качестве индикатора минералообразования: Автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. М., 2007. 46 с.

Рыбаков С. И., Светова А. И. Конкреции в вулканогенно-осадочных отложениях раннего протерозоя Карелии // Литология и полезные ископаемые. 1975. № 1. С. 161–166.

Светов С. А. Древнейшие адакиты Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2009. 115 с.

Светова А. И. Архейский вулканизм Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса Карелии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1988. 148 с.

Томиленко А. А., Гибшер Н. А., Козьменко О. А. и др. Лантаноиды во флюидных включениях, кварце и зеленых сланцах из золотоносных и безрудных кварцево-жильных зон Советского кварц-золоторудного месторождения, Енисейский Кряж, Россия // Геохимия. 2008. № 4. С. 438–444.

Юргенсон Г. А. Типоморфизм и рудоносность жильного кварца. М.: Недра, 1984. 149 с.

Cao Y., Li Sh., Yao M., Zhang H. Significance of quartz REE geochemistry, Shihu gold deposit, western Hebei Province, North China, using LA-ICP-MS // *Frontiers of earth science in China*. 2010. Vol. 4, N 3. P. 337–344.

McLennan S. M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 2, 2001. Art. No. 2000GC000109.

Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // A. D. Saunders, M. J. Norry (eds.). *Magmatism in the ocean basins* / *Geol. Soc. Spec. Publ.* 1989. N 42. P. 313–345.

Uysal T., Gasparon M., Bolhar R. et al. Trace element composition of near-surface silica deposits – A powerful tool for detecting hydrothermal mineral and energy resources // *Chemical Geology*. 2011. N 280. P. 154–169.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Светова Евгения Николаевна

старший научный сотрудник, канд. геол.-минер. наук
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: ensvetova@igkrc.ru

Светов Сергей Анатольевич

зам. директора, рук. лаборатории, докт. геол.-минер. наук
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: ssvetov@krc.karelia.ru
тел. (8142) 782753

Данилевская Людмила Александровна

старший научный сотрудник, канд. геол.-минер. наук
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: danilevs@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 768092

Svetova, Evgeniya

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian
Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ensvetova@igkrc.ru

Svetov, Sergey

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian
Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ssvetov@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 782753

Danilevskaya, Lyudmila

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian
Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: danilevs@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 768092