

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КВАРЦЕ КВАРЦЕВОЖИЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ УРАЛА

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

Приведены результаты исследования закономерностей распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в различных типах жильного кварца эндогенных кварцевожилых образований Урала. Установлено телескопирование наложенных магматогенно-гидротермальных флюидов, фиксирующихся в сохранившихся газовой-жидких включениях в кварцах, образующихся в каждые последующие этапы и стадии развития рудной минерализации, что может быть использовано для расшифровки генезиса кварцевожилых образований и рудной минерализации.

Ключевые слова: редкоземельные элементы; кварцевожилые образования; формации; распределение РЗЭ.

В статье по материалам авторов приводятся результаты исследования закономерностей распределения РЗЭ в различных типах жильного кварца эндогенных кварцевожилых образований Урала.

На первоначальном этапе изучение кварцевых жил и определение в них содержания РЗЭ велось с целью оценки возможности использования жильного кварца для получения высококачественного кварцевого стекла. По мере накопления материалов по исследованию различных типов кварца на содержание в них РЗЭ появилась возможность интерпретации полученных данных для расшифровки генезиса кварцевожилых образований, поскольку содержание структурных примесей и РЗЭ в кварце объективно отражает особенности его генезиса и может быть использовано в качестве критерия прогнозирования и оценки объектов как рудного, так и нерудного минерального сырья.

Изучение онтогении кварцевожилых образований Кочкарского, Теренсайского, Березовского, Уфалейского и других кварцевожилых и кварцевожилых рудоносных полей позволило выделить среди кварцевых жил несколько групп, которые можно рассматривать как самостоятельные формации и субформации кварцевожилых образований. Каждая из них имеет свой механизм образования и занимает определенную геологическую позицию [1–5]. Разработанная классификация кварцевожилых образований приведе-

на в табл. 1. Более подробно онтогенические типы кварцевожилых образований описаны в [4, 5]. В настоящей статье приводятся краткие сведения о формациях *первично-зернистого* и *вторично-зернистого кварца*.

Формация первично-зернистого кварца включает в себя метаморфогенные кварцевые прожилки и мелкие жилы метаморфической дифференциации, тела метасоматических кварцитов, образовавшихся в результате замещения горных пород кварцем на стадии кислотного выщелачивания, а также гидротермальные кварцевые жилы выполнения, сложенные стекловидным, молочно-белым кварцем и мелкозернистым друзовидным кварцевым агрегатом.

Формация вторично-зернистого кварца включает жилы перекристаллизации по прожилкам и мелким жилам метаморфической дифференциации; кварцевые тела, сложенные неоднородно гранулированным кварцем по кварцевожилым телам замещения; кварцевые жилы, сложенные средне- и крупнозернистым однородно гранулированным кварцем, и кварцевые жилы, сложенные тонкозернистым (льдистоподобным) кварцем. Перечисленные типы кварца в практике относят к категории гранулированного кварца.

Следует иметь в виду, что гранулированный кварц является вторичным по отношению к первичному кварцу, слагавшему кварцевожилые тела на первоначальной стадии их образования.

Для изучения химической специализации жильного кварца кварцевых тел различных онтогенических типов были отобраны образцы кварца, визуально не содержащие включения

других минералов. Эти кварцы были исследованы на содержание 50 химических элементов ICP-MS (ИГГ УрО РАН).

Исследован кварц Светлинского, Терен-

Таблица 1

Формации, субформации и минералого-технологические типы кварцево-жильных образований Урала [5]

Геодинамический режим	Формации	Субформация (онтогенический тип)	Генетический тип	Структура кварца	Минералого-технологический тип (эталон)		
Ранняя коллизия, 380–320 млн лет	Кварцево-жильные образования	Жилы перекристаллизации (метаморфической дифференциации)	Метаморфогенный	Грануломорфная, мелко-, среднезернистая, с ровными границами зерен	–		
		Тела замещения (метасоматические кварциты)	Гидротермально-метасоматический	Мелкозернистая с зубчатыми границами зерен	Серебровский		
		Жилы выполнения (включая рудные)	Гидротермальный	Шестоватая, крупно-, гигантозернистая (молочно-белого кварца)	Караяновский, Березовский		
Поздняя коллизия, 320–240 млн лет	Кварцево-жильные образования первично-зернистого кварца	Пегматитовые ядра	Магмагенно-гидротермальный	Шестоватая, крупно-, гигантозернистая	Светлинский		
		Жилы выполнения	Гидротермальный	Шестоватая, крупно-, гигантозернистая (стекловидного кварца)	Пугачевский, гора Хрустальная		
		Минерализованные полости	Гидротермально-метасоматический	Кристаллы в полости	Астафьевский, Додо		
		Тела замещения (метасоматический кварц)	Гидротермально-метасоматический	Мелкозернистая с зубчатыми границами зерен	Грейзеновые место рождения		
	Кварцево-жильные образования вторично-зернистого гранулированного кварца	Жилы перекристаллизации (по жилам метаморфической дифференциации)	Метаморфогенный	Гетеробластовая, крупнозернистая с ровными границами зерен	Слюдяногорский		
		Жилы, сложенные неоднородно гранулированным кварцем (по телам замещения)	Метаморфогенно-метасоматический	Гетеробластовая, мелкозернистая	Уфалейский		
		Жилы, сложенные однородно гранулированным кварцем (по жилам выполнения)	Метаморфогенно-метасоматический	Гранобластовая, средне-, крупнозернистая с ровными границами зерен	Кыштымский		
		Тела, сложенные тонкозернистым (метасоматическим, льдистоподобным) кварцем	Гидротермально-метасоматический	Гранобластовая, тонкозернистая с зубчатыми границами зерен	Егустинский		
		Постколлизийный, моложе 240 млн лет	Кварцево-жильные образования	Тела выполнения, сложенные друзовидным кварцем и полосчатым переливтом	Гидротермально-метасоматический	Друзовые агрегаты, мелкозернистый кварцевый агрегат (переливт)	Шайтанский

сайского, Уфалейского, Вязовского, Ларинского, Березовского, Гумбейского, Велико-

петровского, Айдырлинского и некоторых других кварцевожильных рудоносных полей (табл. 2).

На основе полученной базы данных был проведен анализ поведения редких, рассеянных, редкоземельных, благородных и радиоактивных элементов в кварцевожилых телах различных формаций и субформаций. Наи-

более информативными являются РЗЭ. Ниже характеризуется распределение РЗЭ на базе анализа спайдер-диаграмм в эндогенных кварцевожилых образованиях.

На сводной спайдер-диаграмме распре-

Таблица 2

Описание образцов кварцево-жилых месторождений, результаты анализа которых отражены на спайдер-диаграммах

Номер пробы	Место отбора пробы	Описание образца
Месторождения Среднего Урала		
Хр-1	Месторождение гора Хрустальная	Полупрозрачный молочно-белый гигантозернистый кварц, разлистованный
Хр-2	Месторождение гора Хрустальная	Полупрозрачный молочно-белый гигантозернистый кварц, массивный
Ср-1	Месторождение Светлая речка	Слабодымчатый гигантозернистый полупрозрачный катаклизированный кварц
Бл-В	Благодатское месторождение	Молочно-белый средне-, крупнозернистый кварц с вольфрамитом
Бер-1К	Березовское месторождение	Светло-серый среднезернистый кварц
Бер-2К	Березовское месторождение	Светло-серый крупнозернистый масляный кварц с шеелитом
Бер-П	Березовское месторождение	Сероватый крупнозернистый кварц с кристаллами пирита
Бер-1	Березовское месторождение	Шеелит ярко-оранжевый
Бер-2	Березовское месторождение	Шеелит слабой оранжевой окраски
Уфалейский рудный район (Южный Урал)		
175-уф	Жила 175	Гранулированный кварц уфалейского типа
175-ег	Жила 175	Гранулированный кварц егустинского типа
У-31/1	Жила 101	Гранулированный кварц кыштымского типа
У-32/1	Жила 314	Гранулированный кварц кыштымского типа
У-22/2	Жила 191	Гранулированный кварц егустинского типа
У-28/1	Жила 170	Гранулированный кварц слюдяногорского типа
У-28/2	Жила 170	Гранулированный кварц слюдяногорского типа
У-13/1	Жила 175	Кварц слюдяной, мелкозернистый, массивный
У-37/3а	Гора Теплая	Кварц метасоматический
Светлинский рудный район (Южный Урал)		
С-1/1	Пегматит. Тело № 1	Кристалл дымчатого цвета
Свл-51/4	Гора Калиновая	Молочно-белый гигантозернистый кварц
Свл-51/7	Гора Калиновая	Молочно-белый гигантозернистый кварц, частично гранулированный
С-4/2	Кварцевая жила 500	Кристалл горного хрусталя
Р-3/3	Радиомайский участок	Молочно-белый, слегка прозрачный гигантозернистый кварц
Ки-2/4	Кидышевский участок	Молочно-белый фарфоровидный крупнозернистый кварц
Кс-2	Золоторудный карьер	Сероватый молочно-белый гиганто-, крупнозернистый кварц
Кс-3	Золоторудный карьер	Сероватый крупнозернистый кварц по трещинам с сульфидами
Кс-13	Золоторудный карьер	Светло-серый, слегка прозрачный среднезернистый кварц с шеелитом
Кс-12/1	Золоторудный карьер	Шеелит бледно-желтый в крупнозернистом молочно-белом кварце
Кочкарский рудный район (Южный Урал)		
Коч-А	Кочкарское золоторудное месторождение	Друзовидный кварц серого цвета с арсенопиритом
Е-3	Плютик Еленинской россыпи	Серый кварц среднезернистый с молибденом в мраморе

деления РЗЭ в кварцевожилых образованиях месторождений кварцевожилых и хруста-

ленистой минерализаций и в рудных кварцевых жилах золотой и вольфрамовой специали-

Номер пробы	Место отбора пробы	Описание образца
Ларинское месторождение гранулированного кварца		
Л-163	Кочневский участок	Светло-серый гранулированный кварц кыштымского типа
Л-258	Ларинский участок	Серовато-белый фрагментарно гранулированный кварц кыштымского типа
Ку-21/7	Кундравинский участок	Стекловидный кварц с кианитом
Джабык-Карагайский рудный район (Южный Урал)		
Ас-46	Астафьевское месторождение	Полупрозрачный гигантозернистый кварц с крупными кристаллами пирита
ГУМ-25К	Гумбейское месторождение	Молочно-белый среднезернистый кварц с шеелитом
ГУМ	Гумбейское месторождение	Шеелит бледно-желтый
ГУМ-25	Гумбейское месторождение	Шеелит бледно-желтый
КЖ-5	Кожубаевское месторождение	Светло-серый среднезернистый кварц с сульфидами
Великопетровское месторождение (Южный Урал)		
В-9	Великопетровское месторождение	Сероватый маслянистый крупнозернистый кварц
В-10	Великопетровское месторождение	Сероватый маслянистый среднезернистый кварц с пиритом
В-11	Великопетровское месторождение	Серый мелко-, среднезернистый кварц метасоматический
В-12	Великопетровское месторождение	Катаклазированный кварц, сероватый, среднезернистый
В-13	Великопетровское месторождение	Сероватый мелко-, среднезернистый кварц метасоматический
Зайцевское рудное поле (Южный Урал)		
ГО-1/1	—	Молочно-белый гигантозернистый кварц
ГО-1/1А	—	Сероватый гигантозернистый кварц
ГО-1/2	—	—
Сакмарское рудное поле (Южный Урал)		
Нов-1	Новотроицкое месторождение	Полупрозрачный гигантозернистый кварц
Теренсайское рудное поле (Южный Урал)		
Нур-2/2	Нурбайская площадь	Молочно-белый гигантозернистый кварц
КТ-6	Гора Кумыс-Тюбе	Полупрозрачный крупнозернистый кварц
А-828	Айдырлинское золоторудное месторождение	Сероватый среднезернистый кварц с рудной минерализацией по трещинам

заций выделяются четыре поля (рис. 1, а).

Поле № 1 (показаны только крайние пробы Р-3/3 и Свл-51/4, ооконтуривающие поле распределения) соответствует типичному для жил выполнения кварцу молочно-белого цвета крупно-, гигантозернистой структуры, генетически связанных с массивами раннеколлизийных гранитоидов тоналит-гранодиоритовой формации.

Поле № 2 (ооконтурено по крайним пробам Хр-1 и КУ-21/7) отвечает стекловидному кварцу бесцветной, иногда дымчатой окраски, крупно-, гигантозернистой структуры, характерному для жил выполнения, генетически связанных с массивами позднеколлизийных гранитоидов гранитной формации.

Поле № 3 (ооконтурено по крайним пробам С4/2 и С1/1) по содержанию РЗЭ характеризует кристаллы кварца из наложенных хрустальных гнезд и пегматитов Светлинского

хрусталоносного месторождения.

Поле № 4 совпадает с полями молочно-белого и стекловидного кварца. Это поле гранулированного кварца (ооконтурено по крайним пробам 175-уф и У-32/1), который является продуктом преобразования жил первично-зернистого кварца под действием высокотемпературного и высокобарического метаморфизма. Поле гранулированного кварца практически не затрагивает площадь кристаллов кварца и чистейшего стекловидного кварца, что наглядно видно на рис. 1, б.

Прослеживается четко выраженная закономерность в поведении РЗЭ в разных типах кварца. В целом содержание РЗЭ в жильном кварце и кристаллах очень низкое. Количество РЗЭ понижается с увеличением прозрачности кварца или, точнее, с уменьшением содержания в кварце газово-жидких включений. В гранулированном кварце концентрация РЗЭ

находится на уровне их содержания в молочно-белом и стекловидном кварце.

На рис. 1, б представлена в укрупненном варианте спайдер-диаграмма распределения РЗЭ в гранулированном кварце, на которой прослеживаются три поля. Верхнее поле характеризует поведение РЗЭ в кварце уфалейского типа (пробы 175-уф, Y-28/1, Y-28/2), среднее в кварце егустинского типа (пробы 175-ег, Y-22/2), а нижнее – в кварце кыштымского типа (пробы Л-258, Y-31/1, Y-32/1, Л-163).

Повышенное содержание РЗЭ отмечено в кварце уфалейского типа, что вполне естественно, поскольку этот тип гранулированного кварца является результатом процесса перекристаллизации с укрупнением зерна первичного мелко-, среднезернистого кварца жил мелкозернистого кварца метасоматических кварцитов, которые изначально имели более высокие содержания РЗЭ.

Гранулированный кварц кыштымского типа, который формировался в результате рекристаллизации изначально относительно чистого крупно-, гигантозернистого жильного кварца раннеколлизийных жил выполнения с последующей перекристаллизацией и образованием зерен полигональной формы, по содержанию РЗЭ сопоставим с кварцем жил выполнения с направленностью в сторону уменьшения содержания РЗЭ.

Характер кривых распределения РЗЭ в метасоматическом кварце егустинского типа (175-ег), образовавшемся по кварцу уфалейского типа (175-уф), полностью аналогичен кривым распределения элементов в гранулированном кварце уфалейского типа, но со значительно пониженным их содержанием. Такой характер распределения РЗЭ явно свидетельствует о том, что при развитии кварца егустинского типа происходит очищение кварца уфалейского типа от РЗЭ. В то же время кварц егустинского типа (175-ег), сформировавшийся по жилам уфалейского типа, является менее чистым по РЗЭ по сравнению с его разностью, развившейся по жилам с кварцем кыштымского типа (Y-22/2).

Остановимся более детально на характеристике поля № 1 (рис. 1, б) «безрудного» молочно-белого кварца. Для исследования был отобран кварц из жил месторождений кварцевожильной минерализации, которые от-

носятся к так называемым «безрудным» месторождениям (Гора Хрустальная, Светлореченское, Жила Белая, Астафьевское, Светлинское-хрусталеносное, Новотроицкое, Теренсайское, Тамбовское). На рис. 1, в представлена спайдер-диаграмма распределения РЗЭ в кварце названных месторождений, из которой наглядно видно, что содержание РЗЭ в этих кварцах находится в очень узких пределах, а характер поведения РЗЭ однотипный.

Из диаграммы следует, что кварц жил Радиомайского (обр. Р-3/3) и Кидышского (обр. Ки 2/4) кварцевожильных проявлений, а также месторождения Гора Хрустальная (обр. Хр-1) имеет относительно повышенное содержание элементов иттриевой группы (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu), что обусловлено расположением этих проявлений в экзоконтакте массивов гранитов (соответственно Санарского и Верх-Исетского). Другим исключением является кварц (обр. Е-3) из жилы, пересекающей толщу крупно-, гигантозернистого мрамора (Еленинский карьер, Южный Урал). Благодаря расположению в карбонатной толще кварц имеет очень низкое содержание редкоземельных элементов цериевой группы и особенно низкое элементов иттриевой группы.

Изучен жильный кварц золоторудных и шеелитоносных месторождений Урала: Березовского (Бер-1к, Бер-2к, Бер-П), Кочкарского (Коч-А), Светлинского-золоторудного (КС-2, КС-3, КС-13), Великопетровского (В-9, В-10, В-11, В-12, В-13), Айдерлинского (А-828), Кожубаевского (КЖ-5), Астафьевского-хрусталеносного (АС-46). Спайдер-диаграмма распределения РЗЭ в кварце названных месторождений отображена на рис. 1, г.

На диаграмме наглядно выделяется поле содержания РЗЭ в кварцах золоторудных месторождений, близкое к содержанию РЗЭ в жильном молочно-белом и стекловидном «безрудном» кварце. Поле с повышенным содержанием РЗЭ и аналогичным характером распределения элементов, как и в «безрудном» кварце, отвечает кварцу с наложенной сульфидной минерализацией.

Кварц с ранним шеелитом золоторудных месторождений характеризуется совершенно иным распределением РЗЭ (рис. 1, г), повторяющим характер поведения элементов в соб-

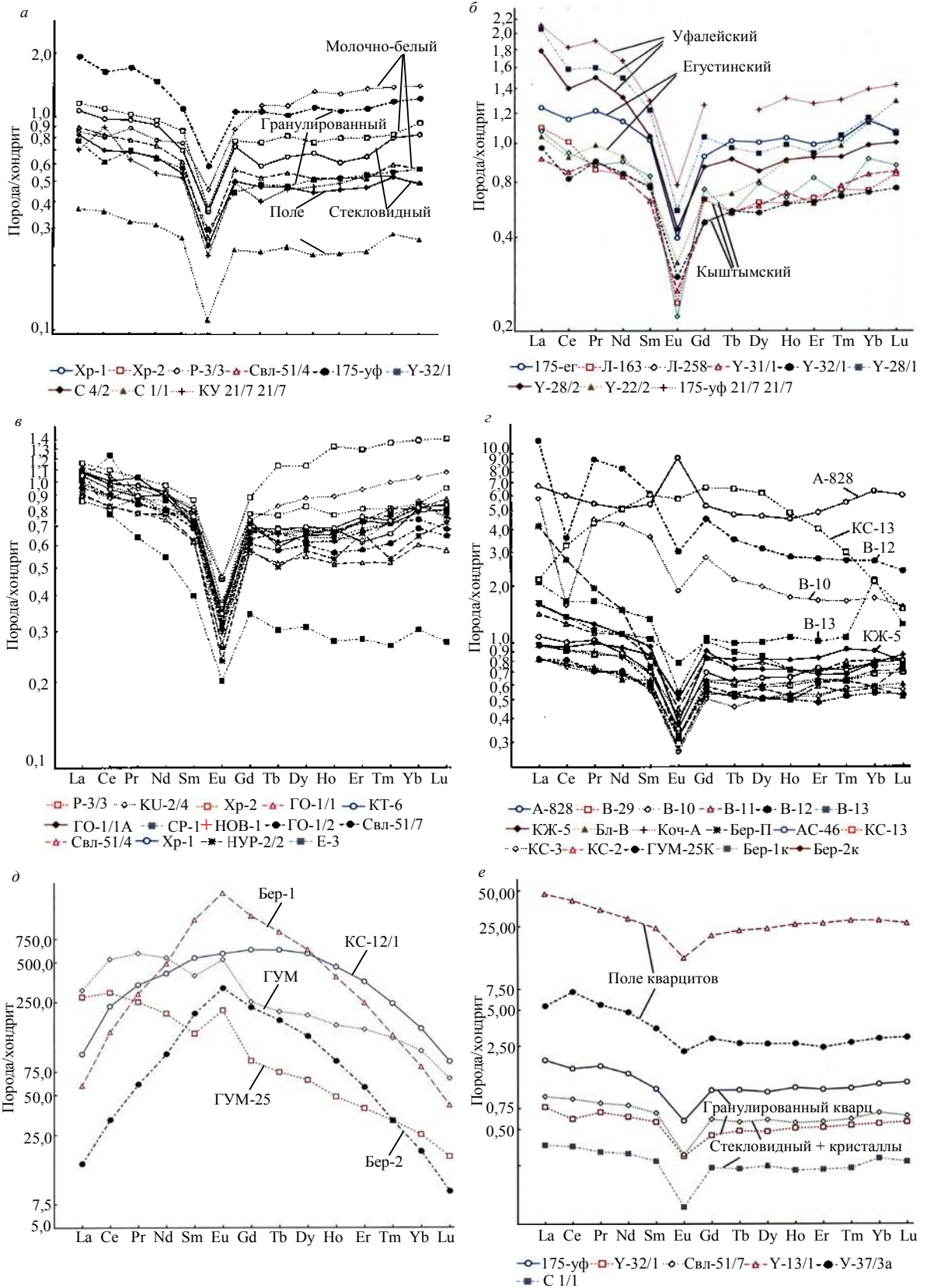


Рис. 1. Поведение редкоземельных элементов:

а – нормированных на хондрит в кварцевожильных телах; *б* – нормированных на хондрит в кварцевожильных объектах гранулированного кварца Уфалейского рудного поля; *в* – нормированных на хондрит в безрудных кварцевых жилах; *г* – нормированных на хондрит в кварцевых жилах золоторудных и шеелитоносных месторождениях; *д* – нормированных на хондрит в шеелитах шеелитоносных месторождений Урала; *е* – в метасоматических кварцитах и кварцевожильных образованиях

ственно шеелитах этих месторождений (рис. 1, д).

На рис. 1, е приведено сравнение распределение РЗЭ в кварцитах и кварцевожильных образованиях. По уровню концентрации РЗЭ в исследуемых образованиях отчетливо выделяют две их группы: первая расположена в верхней части диаграммы и соответствует метасоматическим кварцитам, а вторая занимает нижнюю ее часть и отвечает кварцевожильным образованиям.

На поле кварцевожильных образований выделяются две зоны: верхняя – зона жил гранулированного кварца Уфалейского рудного поля, а нижняя – зона стекловидных кварцевых жил выполнения и кристаллов горного хрусталя Светлинского рудного поля. Учитывая, что РТХ-параметры образования субстанций обеих групп сопоставимы, причину такого различия, очевидно, следует искать в составе эдуктов (для кварцитов) и вмещающих пород (для кварцевожильных образований). Представляется, что главными эдуктами в пределах Уфалейского метаморфического блока, где сосредоточена основная масса кварцитов и кварцевожильных образований, являются гнейсы и амфиболиты, а для кварцевых жил Светлинского поля вмещающими породами являются кристаллические сланцы.

Таким образом, приведенные данные по химическому составу и физическим свойствам жильного кварца, формам вхождения в него элементов-примесей, их концентрациям дают основания сделать следующие выводы.

Кварц – основной минерал кварцевожильных образований, которые являются объектами добычи рудных и нерудных полезных ископаемых. В практике геологоразведочных и добычных работ устойчиво закрепились термины «рудный» и «безрудный» кварц. Это разделение является значительно устаревшим и не подтверждается нашими исследованиями.

Эндогенные кварцевожильные образования Урала по способу формирования кварца на основе онтогенических критериев подразделяются на тела перекристаллизации, замещения, выполнения, рекристаллизации, сложной онтогении. Как правило, они формируются как моно-неральные кварцевые тела, которые являются благоприятной физико-химической средой для локализации наложенной рудной и хрусталеносной минерализаций.

Схожий характер кривых распределения РЗЭ в кварце жил выполнения месторождений «рудных» и «нерудных» полезных ископаемых позволяет сделать вывод о наложенности рудной минерализации на жильный кварц тел выполнения, которые служат рудовмещающей средой. Повышенное содержание РЗЭ в рудном кварце связано с многостадийным наложением рудной минерализации, сопровождающейся развитием мелкозернистого метасоматического кварца, на кварц жил выполнения и замещения. Четко прослеживается телескопирование наложенных магматогенно-гидротермальных флюидов, фиксируемых в сохранившихся газовой-жидких включениях в кварцах, образующихся в каждые последующие этапы и стадии развития рудной минерализации.

Поле содержания РЗЭ гранулированного кварца совпадает с полем содержания РЗЭ молочно-белого и стекловидного кварцев. Такое явление свидетельствует о явном наследовании гранулированным кварцем содержания РЗЭ своего эдукта, что подтверждает заключение о вторичности гранулированного кварца по отношению к первичному кварцу. Содержание структурных примесей в кварце объективно отражает особенности его генезиса и может быть использовано в качестве поисковых признаков прогнозирования и оценки объектов, в особенности на ранних стадиях геолого-разведочных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Минерагения шовных зон Урала / В. А. Коротеев [и др.]. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 416 с.
2. Закономерности размещения и условия образования особо чистого кварца / Ю. А. Поленов [и др.] // ДАН. 2005. Т. 405, № 2. С. 1-4.
3. Кварцевожильная минерализация Уфалейского коллизийного блока (Южный Урал) / Ю. А. Поленов [и др.] // Литосфера. 2006. № 2. С. 123-134.
4. Поленов Ю. А., Огородников В. Н., Сазонов В. Н. РЗЭ в метасоматических кварцитах и кварцевожильных образованиях Уфалейско-Карабашского блока (Южный Урал) и их индикаторная роль // Горно-геологический журнал.

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.

Поленов Юрий Алексеевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: fgg.gl@m.ursmu.ru

Огородников Виталий Николаевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: fgg.gl@m.ursmu.ru

Савичев Александр Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник кафедры геологии. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: ansavichev@mail.ru