

*Тирмяев А.Ф. и др.* Повышение селективности рентгенолюминесцентной сепарации алмазов методом цифровой обработки сигналов. ФТПРТ // [www.misd.nsc.ru/publishing/jms/ numbers/2007/a5\\_2007](http://www.misd.nsc.ru/publishing/jms/numbers/2007/a5_2007).

*Владимиров Е.Н. и др.* Повышение эффективности работы сепаратора алмазов за счёт цифровой обработки сигналов // Современная электроника, 2008. № 2. С. 64-69.

Патент РФ RU 2271254 С2. 2006 г. Способ разделения минералов по их люминесцентным свойствам и способ определения порога разделения.

*Чантурия В.А., Горячев Б.Е.* Обогащение алмазосодержащих кимберлитов // Горный журнал, 2007. № 2. С. 39-44.

RMS DPI 2008-3-51-0

## СВЯЗЬ ПАЛЕОДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КВАРЦА С ДЕФЕКТНОСТЬЮ ЕГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

**Раков Л.Т. ([rakovlt@mail.ru](mailto:rakovlt@mail.ru))**

*Московское отделение. ФГУП “Всероссийский институт минерального сырья”*

correlation between paleodosimetric properties of quartz and its crystalline structure Defection

Rakov L.T.

*Moscow branch. Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific-Research Institute of mineral resources”*

Закономерности распределения радиационных дефектов в кварце, регистрируемых методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), несут важную информацию о радиационной предыстории минерала. Анализ этой информации позволяет оценить время контакта кварца с радиоактивными элементами и дозу его природного радиационного облучения. На основе результатов измерений концентраций радиационных дефектов в кварце можно устанавливать пути миграции урана, определять возраст урановых месторождений, проводить датирование геологических процессов (Данилевич, Павшуков, 1975; Моисеев и др., 1980; Моисеев, 1985). Среди радиационных дефектов в кварце наибольшее применение в палеодозиметрии нашли  $E_1'$ -центры, а также Al-O<sup>-</sup>, Ti-, O<sub>2</sub><sup>3-</sup>, Д- и другие парамагнитные дефекты (Моисеев, 1985; Раков, 2008).

Оценка возраста геологических объектов, проводимая методами палеодозиметрии, включает в себя определение палеодозиметрических свойств кварца. Важнейшим из них является радиационная чувствительность кварца, численно равная количеству радиационных дефектов, образованных в кварце под действием единичной дозы природного радиационного облучения. Обнаружено, что значение радиационной чувствительности кварца зависит как от вида природного радиационного облучения (Моисеев, Раков, 1975), так и от индивидуальных особенностей минерала. Наиболее простым и эффективным способом оценки радиационной чувствительности считается ее экспериментальное определение путем искусственного радиационного облучения кварца (Моисеев, 1985).

Однако, как показали дальнейшие исследования, искусственно стимулированные радиационные процессы в кварце принципиально отличаются от природных процессов (Раков, 2003). Поэтому использование результатов лабораторных экспериментов для оценки значения радиационной чувствительности и других палеодозиметрических параметров нельзя считать корректным. Более высокая точность и правильность геологического датирования могут быть получены, если палеодозиметрические измерения будут опираться на результаты анализа закономерностей распределения радиационных дефектов в кварцах, облученных в природных условиях. Принимая во внимание, что между всеми видами структурных дефектов существует тесная взаимосвязь (Раков, 2008), можно предположить, что палеодозиметрические свойства кварца определяются, в первую очередь, дефектами кристаллической структуры минерала.

В этой связи, нами проводилось исследование влияния на радиационную чувствительность кварца ионов изоморфных примесей. Поскольку структурный алюминия составляет их основную часть, то главное внимание в работе уделялось этой примеси.

Для изучения были отобраны образцы кварца из ряда урановых месторождений в осадочных породах: Сабырсай (Казахстан), Учкудук (Узбекистан), Сулучек (Казахстан), Карамурун (Казахстан), Адамовка (Украина), Имское (Забайкалье). Большинство из этих месторождений относится к инфильтрационному типу, а их возраст колеблется в пределах от нескольких сотен тысяч лет до 200 млн. лет. Исследуемые образцы представляли собой кварцевые зерна, сохранившие естественную поверхность и имеющие крупность от 0,25 до 0,5 мм.

Анализ некоторых образцов под бинокляром показал, что зерна кварца, из которых они состоят, существенно отличаются по цвету. В одном и том же образце наблюдаются как прозрачные, так и дымчатые по цвету кварцы. Различный цвет зерен вызван разным содержанием в кварце изоморфного алюминия. Под действием природного радиационного облучения ионы  $Al^{3+}$  в решетке кварца захватывают дырки и переходят парамагнитное состояние, образуя Al-O-центры. Возникшие парамагнитные Al-O-центры являются одновременно и центрами окраски. Поэтому по цвету зерен можно судить об относительном содержании в них изоморфного алюминия.

Нами проводилось разделение каждого из таких образцов на две навески. Одну из них составляли светлые зерна кварца, имеющие, предположительно, пониженную концентрацию центров окраски, другую – темные зерна с их повышенным содержанием. Результаты изучения навесок кварца методом ЭПР показали, что они, в самом деле, отличаются концентрациями Al-O-центров ( $C_{Al}$ ) (см. табл.).

В то же время в значительной части образцов различия в окраске зерен кварца проявлены слабо. В подобных образцах кварц, как правило, светлый, а сами образцы приурочены к породам с содержанием урана  $C_U=0,01\%$ . По всей видимости, дозы природного радиационного облучения кварца в данных образцах оказались недостаточными для образования в минерале заметных концентраций Al-O-центров. Поэтому такие образцы подвергались дополнительному искусственному g-облучению от источника  $^{60}Co$  дозой  $10^8$  рад для перевода в парамагнитное состояние всего структурного алюминия. После они также разбирались на две навески по цвету кварцевых зерен.

Во всех отобранных навесках кварца методом ЭПР измерялись концентрации  $E_1'$ -центров ( $C_E$ ). Обнаружено, что распределение этих дефектов в кварцевых навесках подчиняется определенной закономерности. Почти во всех случаях более высокие содержания  $E_1'$ -центров установлены в пробах темного кварца (см. табл.). Только в образцах из Имского месторождения наблюдается обратная картина – темный кварц содержит меньшие концентрации  $E_1'$ -центров, чем светлый.

Касаясь природы установленной закономерности, нужно сказать, что разница в концентрациях  $E_1'$ -центров в кварцах светлой и темной окраски не может быть вызвана различием в дозах их природного радиационного облучения. Действительно, кварцы обоих типов находились в едином образце осадочной породы, а распределение отдельных кварцевых зерен в его объеме носили хаотичный характер. Обогащение породы ураном происходило в результате инфильтрационных процессов, никак не связанных с природой образования кварца. Поэтому кварцы темной и светлой окраски в природных условиях не могли подвергаться различному радиационному воздействию.

Единственным разумным объяснением связи концентраций  $E_1'$ -центров с окраской кварцевых зерен остается предположение о том, что радиационная чувствительность кварца зависит от содержания изоморфного алюминия.

Изменение радиационной чувствительности кварца с ростом содержания структурного алюминия прослеживается не только на примере  $E_1'$ -центров. В темных навесках кварца обнаружены более высокие содержания других палеодозиметрических дефектов – D- и  $O_2^{3-}$ -центров. Следовательно, наличие изоморфных примесей в кристаллической решетке кварца стимулирует образование целого ряда структурных дефектов, природа которых связана с воздействием естественной радиации на минерал.

Обнаруженная закономерность дает возможность глубже осмыслить сущность природных радиационных процессов, протекающих в кварце. Оказывается, что образование радиационных дефектов нельзя рассматривать, только как акт взаимодействия продуктов распада радиоактивных элементов с кристаллической решеткой кварца. Большое значение для возникновения радиационных дефектов имеет состояние решетки минерала, определяемое, главным образом, степенью ее дефектности. Одним из проявлений такой дефектности является наличие в кварце изоморфных примесей.

Анализ накопленных к настоящему моменту экспериментальных данных показывает, что влияние изоморфных примесей на радиационную чувствительность кварца нельзя сводить к эффекту “разрыхления” решетки минерала ионами этих примесей. Присутствие изоморфных примесей не увеличивает вероятность взаимодействия ионов решетки с радиоактивными частицами и, как

**Значения концентраций  $E_1'$ -центров ( $C_E$ ) в образцах кварца различного цвета из месторождений урана в осадочных породах**

Месторождение	Образец	$C_U$ %	Цвет кварца	$C_{Al}$ отн. ед.	$C_E$ отн. ед.
Сабырсай	539	0,004	светлый	3,1	3,0
			темный	14	6,5
	550	0,086	светлый	5,7	9,7
			темный	12	11
	651	0,52	светлый	5,4	24
			темный	19	30
	519	0,24	светлый	3,6	20
			темный	14	23
Учкудук	2851	3,27	светлый	35	7,3
			темный	41	16
	2852	1,10	светлый	14	4,0
			темный	18	16
	2853	1,12	светлый	12	6,6
			темный	14	14
Сулучек	С-85-32	0,2	светлый	3,2	5,5
			темный	13	13
	С-102-69	0,13	светлый	3,8	10
			темный	13	18
	С-50-1076	0,08	светлый	3,1	8,7
			темный	12	16
	С-522-8	0,004	светлый	4,9	2,0
			темный	31	3,3
Карамурун	3185-13	0.0005	светлый	5,9	2,7
			темный	24	3,8
	566-200	0,0038	светлый	4,3	11
			темный	16	41
	785-3385	0,1	светлый	3,4	8,2
			темный	4,4	17
	3144-807	3,0	светлый	2,4	3,6
			темный	3,7	17
Адамовка	41/1ш	0.014	светлый	4,1	33
			темный	18	36
	49/1ш	0,97	светлый	6,7	99
			темный	21	127
	58/1ш	0,103	светлый	6,8	74
			темный	23	105
	54/1ш	0,013	светлый	4,5	32
			темный	23	37
Имское	73с-163	н/о	светлый	11	44
			темный	19	35
	73с-160	0,063	светлый	13	72
			темный	20	57
	72с-158	0,010	светлый	11	114
			темный	21	105

Примечания: для Al-O-центров 1 отн.ед. =  $10^{17}$  сп/г, для  $E_1'$ -центров 1 отн.ед. =  $4 \cdot 10^{14}$  сп/г. Ошибка измерений концентраций Al-O-центров - 15%, концентраций  $E_1'$ -центров – 7%.

следствие, образования новых структурных дефектов. Например, наличие иона  $Al^{3+}$  в кремнекислородном тетраэдре не приводит к быстрой потере этим тетраэдром иона кислорода в условиях радиационного облучения кварца. Обнаружено, что вероятность такого события мала, а

концентрация образующегося в этом случае  $E_6'$ -центров (Раков, 1984) в кварце низка. Более того, как было установлено, природа возникновения  $E_6'$ -центров в большей мере связана с диффузионными процессами в кварце, чем с радиационными.

Очевидно, участие изоморфных примесей проявляется на стадии формирования и стабилизации радиационных парамагнитных дефектов. Видимо, этот тип дефектов, как и другие виды структурных дефектов в кварце, также образуется через активированный комплекс (Раков, 2005). Не исключено, что изоморфные примеси могут играть роль спарринг-дефектов для формирующихся радиационных дефектов и прямым или косвенным образом способствовать их стабилизации.

Зависимость палеодозиметрических свойств кварца от содержания изоморфных примесей дает основание предполагать, что серьезное влияние на эти свойства могут оказывать процессы метаморфизма. Нами установлено, что воздействие указанных процессов может приводить как к обогащению кварца изоморфными примесями, так и к обеднению ими. Поэтому по радиационным характеристикам кварцы, подверженные процессами метаморфизма, будут всегда отличаться от исходных. Данное обстоятельство необходимо учитывать в практической палеодозиметрии.

В заключение следует отметить сложность затронутой проблемы. Результаты проведенных исследований пока не позволяют выяснить механизм взаимодействия изоморфных примесей или других структурных дефектов с радиационными дефектами в кварце. Несомненно, его характер очень сложен, о чем свидетельствует обратная корреляция между содержанием структурного алюминия и радиационной чувствительностью кварца из Имского месторождения (см. табл.). Однако полученные данные дают возможность наметить пути дальнейших исследований природных радиационных процессов в кварце с целью разработки новых высокоэффективных индикаторов условий минералообразования и палеодозиметрических методов геологического датирования.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 07-05-00821 и № 08-05-01089).*

### Список литературы

*Данилевич А.М., Павшуков В.В.* Применение метода электронного парамагнитного резонанса для изучения миграции радиоактивных элементов и определения возраста оруденения // Тезисы докладов 2-ого Всесоюзного радиогеохимического совещания. Душанбе, 1975. С. 215-216.

*Моисеев Б.М., Раков Л.Т.* Образование Al- и  $E'$ -центров в кварцах под действием природного облучения // Докл. АН СССР. 1975. Т. 223. № 5. С. 1215-1217.

*Моисеев Б.М., Стрелянов Н.П., Давыдов М.А., Раков Л.Т.* Изучение миграции урана в продуктивных терригенных отложениях методом ЭПР-спектроскопии // Геохимия. 1980. № 7. С. 1081-1088.

*Раков Л.Т.* ЭПР облученного в природе поликристаллического кварца // ДАН СССР. 1984. Т. 278. № 2. С. 452-455.

*Моисеев Б.М.* Природные радиационные процессы в минералах. М.: Недра, 1985. 174 с.

*Раков Л.Т.* Природные и искусственно стимулированные радиационные процессы в кварце: сходство и различия // Геохимия, 2003. № 7. С. 773-784.

*Раков Л.Т.* Общие закономерности образования структурных дефектов в кварце // Геохимия. 2005. № 11. С. 1196-1207.

*Раков Л.Т.* Научные основы применения структурных дефектов в кварце в качестве индикатора минералообразования. Дис... докт. геол.-мин. наук. М., 2008. 329 с.