

УДК 550.424+546.291+549.514.51

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ ГЕЛИЯ В КРИСТАЛЛЫ ПРИРОДНОГО КВАРЦА

© 2003 г. С. В. Икорский, И. Л. Каменский, Б. З. Певзнер, М. А. Ганнибал

Представлено академиком Ф.П. Митрофановым 24.06.2002 г.

Поступило 19.07.2002 г.

При изучении изотопов Не в разрезе Кольской сверхглубокой скважины установлено, что на фоне коровых, радиогенных значений отношения  $^3\text{He}/^4\text{He}$ , характерных для разреза скважины и равных  $(1.8-3) \cdot 10^{-8}$ , в зонах крупных тектонических нарушений как в породах независимо от их генезиса и содержания радиоактивных элементов, так и в кварце жильных образований величина  $^3\text{He}/^4\text{He}$  возрастает в несколько раз и достигает значений  $(10-12) \cdot 10^{-8}$  [1], что указывает на присутствие в составе Не до 1% мантийной компоненты. Особенно наглядно эта геохимическая особенность проявилась в зоне Лучломпольского разлома, приуроченного к контакту нижнепротерозойских заполярной вулканогенной и лучломпольской осадочной свит, находящемуся на глубине 4673 м. На основании этих данных было сделано предположение, что по проницаемым зонам, приуроченным к тектоническим нарушениям, происходит движение флюидов, содержащих гелий с примесью мантийной компоненты. Такой привносимый Не проникал в породы и минералы и накапливался в уже существующих флюидных включениях микроскопического размера, вскрываемых при тонком измельчении, которое применялось в целях извлечения Не для изотопного анализа. Подобное предположение исходило, в частности, из отмеченной ранее повышенной проницаемости гелия по отношению к кварцу [2].

Для подтверждения этого предположения были проведены экспериментальные исследования возможности проникновения гелия в природный кварц и накопления Не во флюидных включениях, уже существовавших в кристаллах. Исследования включали в себя две операции. Сначала об-

разцы кварца помещали в металлический контейнер, заполненный гелием, где выдерживали определенное время при повышенных температуре и давлении Не. Затем образцы извлекали из контейнера и измельчали в вакуумированных стеклянных ампулах по методике [3]. Ампулы с выделившимся при измельчении гелием вскрывали в системе напуска масс-спектрометра МИ-1201 № 22-78. Изотопный анализ гелия выполняли по методике [4].

В основу постановки этих исследований было положено предположение, что образцы кварца, содержащие большее количество флюидных включений, будут в большей степени насыщены гелием, чем образцы, в которых включений меньше. Для опытов из гранитных пегматитов Кольского полуострова отобраны три образца, в которых ранее был изучен состав газов и установлено, что их преобладающим компонентом (>90%) является  $\text{CO}_2$  (табл. 1). Извлечение газов производили методом дробления. Под микроскопом в кварце наблюдали мелкие включения  $\text{CO}_2$  размером 10–8 мкм и меньше [5, 6]. Исходя из этого за условную меру содержания (объем) включений было принято количество  $\text{CO}_2$ , извлекаемое при дроблении кварца. Таким образом, подтверждением миграции гелия извне и накопления его во включениях должна была быть прямая корреляция между содержанием в образцах кварца диоксида углерода и количеством гелия, извлекаемого из образцов дроблением после их насыщения Не. В соответствии с этим подходом для экспериментов были взяты образцы с возрастающим содержанием  $\text{CO}_2$  ( $\text{см}^3/\text{г} \cdot 10^{-2}$ ) – от 2.6 до 20.0 (см. табл. 1). Содержание Не в образцах незначи-

Геологический институт  
Кольского научного центра  
Российской Академии наук,  
Апатиты Мурманской обл.  
Институт химии силикатов  
им. И.В. Гребенникова  
Российской Академии наук, Санкт-Петербург

**Таблица 1.** Содержание газов ( $\text{см}^3/\text{г}$ ) в экспериментальных образцах кварца (извлечение дроблением)

№ обр.	$\text{CO}_2 \times 10^{-2}$	$\text{CH}_4 \times 10^{-4}$	$\text{C}_2\text{H}_6 \times 10^{-6}$
76-3	2.6	0.12	0.2
76-236	6.1	29.5	35.0
76-136	20.0	1.7	2.7

**Таблица 2.** Результаты опытов по насыщению гелием флюидных включений в природном кварце с разным содержанием CO<sub>2</sub>

№ обр.	CO <sub>2</sub> , см <sup>3</sup> /г × 10 <sup>-2</sup>	Содержание гелия, см <sup>3</sup> /г			Содержание <sup>40</sup> Ar*, см <sup>3</sup> /г × 10 <sup>-6</sup>		
		до насыщения, × 10 <sup>-8</sup>	после насыщения, × 10 <sup>-3</sup>		до насыщения	после насыщения	
			120 ч	598 ч		120 ч	598 ч
(1) 76-3	2.6	1.7	1.11	2.15	102.4	102.9	72.1
(2) 76-236	6.1	4.0	1.46	3.58	3.5	2.5	2.6
(3) 76-136	20	3.8	3.33	7.82	33.0	25.9	25.0

Примечание. <sup>40</sup>Ar\* (радиогенный аргон) рассчитывался по формуле:  $^{40}\text{Ar}^* = ^{40}\text{Ar}_{\text{изм}} \cdot (1 - 295.6 / (^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{изм}})$ , где 295.6 – отношение <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar в воздухе.

тельно и не превышает  $4 \cdot 10^{-8}$  см<sup>3</sup>/г. Образцы взяты из разведочных канав, пегматиты относятся к редкометалльному типу [5].

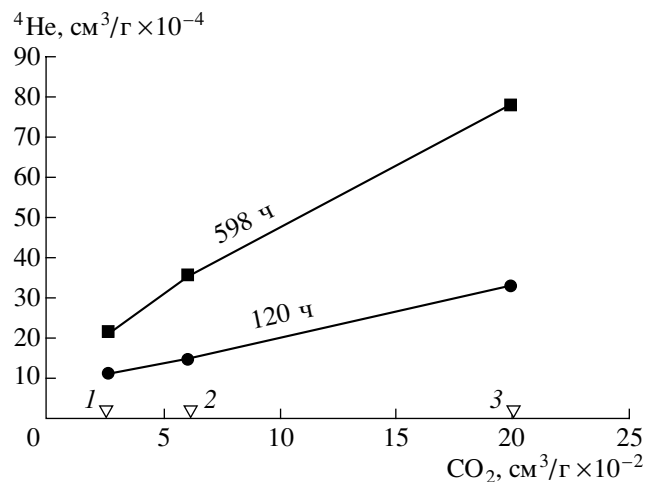
Выдержку образцов кварца в контейнере осуществляли при температуре  $208 \pm 5^\circ\text{C}$  и давлении гелия 58 кгс/см<sup>2</sup>. Температура выбрана исходя из данных термовакуумной декрепитации [6] с таким расчетом, чтобы при прогреве в атмосфере He было исключено вскрытие включений. Выбор давления He определялся техническими возможностями. Для опытов из каждого образца кварца было приготовлено по две навески по 0.5 г, эти шесть навесок были объединены в две группы, одна из которых выдерживалась при указанных условиях 120 ч, а вторая – 598 ч. Размер зерен в навесках 0.4–0.5 мм. Время между окончанием насыщения и анализами составило более девяти месяцев. В анализах кроме гелия выполняли определения аргона как показателя сохранности включений после прогрева образцов. Вакуумирование навесок в стеклянных ампулах происходило в течение 1 ч с подогревом ампулы до 105–110°C. Таким образом, возможность сохранения He в каких-либо открытых трещинах в зернах кварца исключалась.

Результаты экспериментов показали (табл. 2), что в образцы кварца мигрировали значительные количества гелия, которые на пять порядков превышают содержания гелия в образцах до опытов. Количество импрегнированного гелия находится в прямой корреляции с содержанием CO<sub>2</sub> в кварце, условно принимаемом за суммарный объем включений, и временем насыщения (рис. 1). Существенно изменился и изотопный состав гелия после насыщения. До насыщения величина отношения <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He во включениях составляла  $(189\text{--}268) \cdot 10^{-8}$ , после она снизилась до  $(1.0\text{--}1.2) \cdot 10^{-8}$ , что соответствует составу гелия в баллоне, использованном для проведения опытов.

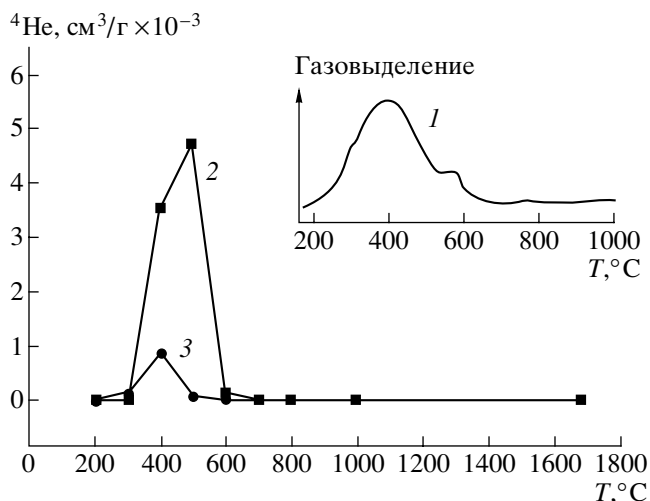
Измеренные значения изотопного отношения <sup>40</sup>Ar/<sup>36</sup>Ar в извлекаемом аргоне находятся в интер-

вале 1433–48047. Содержания радиогенного <sup>40</sup>Ar\* до и после насыщения близки между собой (см. табл. 2), что подтверждает сохранность включений при прогреве в контейнере. Вместе с тем на примере обр. 76-136, условия декрепитации в котором изучены ранее, видно, что при прогреве этого образца до 208°C в контейнере, заполненном He, относительная потеря <sup>40</sup>Ar\* (~24%) примерно в 3 раза больше, чем были потери CO<sub>2</sub> (7.8%) при прогреве в воздухе до 290°C [6]. Можно полагать, что аргон и CO<sub>2</sub> находятся во включениях с разными температурами декрепитации.

Тот факт, что гелий, проникая в кристаллы кварца, концентрируется во включениях, которые можно рассматривать как своеобразные “ловушки”, подтверждают и результаты ступенчатого отжига обр. 76-136 после его насыщения гелием в течение 598 ч. Как видно из рис. 2 (кривые 2 и 3), выделение импрегнированного гелия происходит



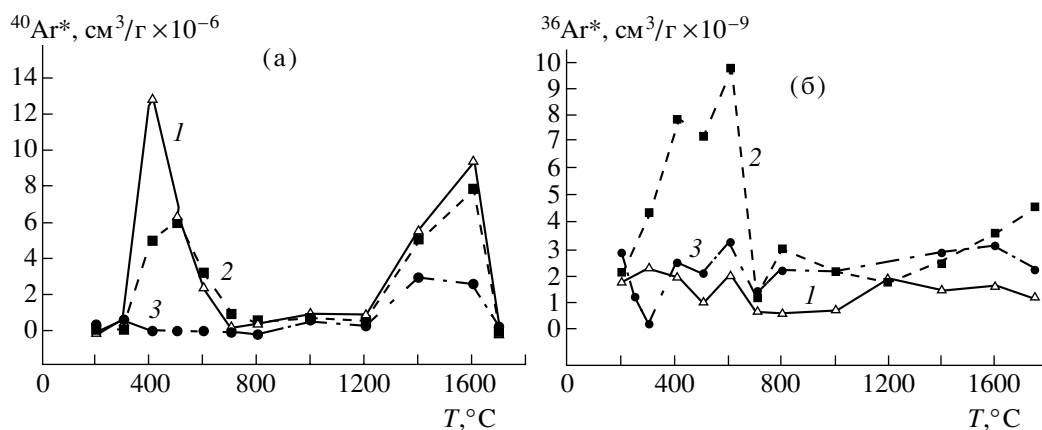
**Рис. 1.** Зависимость насыщения гелием образцов кварца от содержания CO<sub>2</sub> и времени насыщения: 1, 2 и 3 – положение образцов 76-3, 76-236 и 76-136 соответственно.



**Рис. 2.** Термовакuumная декрептограмма образца кварца 76-136 и характер выделения импрегнированного гелия при ступенчатом отжиге кварца после его выдержки в контейнере с He: 1 – кривая газовыделения при термовакuumной декрепитации; 2 – выделение гелия при отжиге навески с размером зерен 0.4–0.5; 3 – выделение гелия из той же навески после ее измельчения в ампуле. Видно, что в результате дробления были вскрыты практически все включения с импрегнированным гелием.

в том же температурном интервале, в котором наблюдается газовыделение при термовакuumной декрепитации. Суммарный объем гелия, извлеченный при ступенчатом отжиге ( $8.37 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{г}$ ), практически совпадает с количеством гелия, полученным при измельчении этого образца после

его насыщения He в течение 598 ч (см. табл. 2). Подобное совпадение указывает на то, что накопление He происходит преимущественно в относительно крупных включениях, вскрываемых при измельчении. Сохранность включений при отжиге после прогрева образцов в контейнере подтверждают и графики выделения аргона при ступенчатом отжиге обр. 76-136. На рис. 3а видно, что выделение аргона до и после прогрева происходит практически в одних и тех же температурных интервалах, один из которых (низкотемпературный) совпадает с температурой вскрытия декрепитирующих включений и выделением импрегнированного гелия, а второй соответствует переходу  $\beta$ -тридимит– $\beta$ -кristобалит при  $1470^\circ\text{C}$ . Высокотемпературные микровключения, видимо, слабо флюидонасыщены и не вскрываются при температуре декрепитации включений с импрегнированным гелием. Они, очевидно, и меньше размером, так как дробление оставляет часть их не вскрытыми (см. рис. 3а, кривые 2 и 3). Потери  $^{40}\text{Ar}^*$  в процедуре насыщения произошли из низкотемпературных включений (см. рис. 3а, кривые 1 и 2). В то же время на рис. 3б видно, что процедура насыщения гелием при  $208^\circ\text{C}$  привела к увеличению содержания  $^{36}\text{Ar}$  во флюидных включениях низкотемпературной зоны. Это объясняется тем, что из контейнера перед его заполнением гелием, воздух, в котором содержится до 0.93 об. % аргона с отношением  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 295.6$ , не удалялся и воздушный аргон проник в кварц и зафиксировался в тех же ловушках, что и гелий.



**Рис. 3.** Выделение  $^{40}\text{Ar}^*$  (а) и  $^{36}\text{Ar}$  (б) при ступенчатом отжиге обр. 76-136. 1 – исходная навеска 0.4–0.5 мм, не прошедшая насыщения гелием; 2 – такая же навеска после насыщения He в течение 598 ч при  $208^\circ\text{C}$ ; 3 – порошок после измельчения в ампуле навески 0.5–0.4 мм, прошедшей операцию насыщения. На рис. а видно, что процедура насыщения привела к потере около 30%  $^{40}\text{Ar}^*$  в низкотемпературной зоне (кривые 1 и 2), а дробление в ампуле насыщенной гелием навески (кривая 3) полностью разрушило включения с  $^{40}\text{Ar}^*$ , декрепитирующие в низкотемпературной зоне и, частично, – в высокотемпературной (кривая 3). Графики на рис. б показывают возрастание содержания  $^{36}\text{Ar}$  во включениях низкотемпературной зоны в результате насыщения кварца гелием (кривая 2) и некоторое увеличение выделения  $^{36}\text{Ar}$  около точки плавления образца.

Проведенные опыты наглядно показали возможность миграции He во флюидные включения, содержащиеся в кристаллах кварца, и, следовательно, возможность обмена гелием между содержимым включений и окружающими кварц флюидными растворами. Пример такого процесса – разрез Кольской сверхглубокой скважины. Механизм миграции He пока неясен. Возможно, импрегнирование гелия во флюидные включения происходит через структурные каналы в кристаллической решетке, а также через дефект-каналы, возникновение которых связано с дефектами роста кварца и наличием примесей [7].

Работа выполнена при поддержке Швейцарского национального научного фонда (проект 7SUPJ062127).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Икорский С.В., Каменский И.Л.* В кн.: Кольская сверхглубокая: Научные результаты и опыт исследования. М.: МФ “Технонефтегаз”, 1998. С. 87–92.
2. *Толстикин И.Н.* Изотопная геохимия аргона, гелия и редких газов. Л.: Наука, 1986. 200 с.
3. *Икорский С.В., Каменский И.Л.* XV симп. по геохимии изотопов, 24–27 ноября 1998, Москва: Тез. докл. М., 1998. С. 113.
4. *Katensky I.L., Tolstikhin I.N., Vetrin V.R.* // *Geochim et cosmochim. acta.* 1990. V. 54. P. 3115–3122.
5. *Икорский С.В., Волошин А.В.* // *Геохимия.* 1982. № 10. С. 1464–1470.
6. *Икорский С.В., Саргсян Г.О.* // *Геохимия.* 1990. № 8. С. 1205–1210.
7. *Цинзерлинг Е.В.* // *Зап. ВМО.* 1964. Т. 93. В. 3. С. 342–348.