Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 550.424.4

DOI: 10.19110/geov.2020.2.1

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА РЕКОНСТРУКЦИИ КОНЦЕНТРАЦИЙ ГЕЛИЯ В ГЛУБИННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ

М. А. Ганнибал

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

m.a.gannibal@gmail.com

Усовершенствована методика реконструкции концентраций радиогенного гелия в глубинных подземных водах путем изучения гелия в газовой-жидких включениях (внутреннем объеме) кварца, извлеченного из керна скважин. Предложенная модификация позволяет выделить составляющую внутреннего объема образца, стабильную при температуре опытов, для чего было предложено подвергать образцы кратковременному предварительному прогреву, при котором должны разрушиться включения, вскрывающиеся при низких температурах. Реконструированные в ходе отработки методики значения P_{He} во внутреннем объеме образцов свидетельствуют о правдоподобии и хорошей воспроизводимости результатов. На образцах кварца из Кольской сверхглубокой скважины была также протестирована методика предварительной разбраковки образцов при помощи регистрации кривых выхода гелия в ходе линейного нагрева образца. Показано, что таким образом можно выбрать потенциально подходящие образцы, диагностировать наличие декрепитирующих газовой-жидких включений и мест нахождения гелия, не связанных с кристаллической структурой кварца. Изложены методологические соображения по поводу организации подобных исследований и способов верификации полученных результатов.

Ключевые слова: гелий, подземные воды, изотопы, сохранность, диффузия, время пребывания.

MODIFIED PROCEDURE OF RECONSTRUCTION OF HELIUM CONCENTRATIONS IN DEEP GROUNDWATERS

M. A. Gannibal

Geological Institute, KSC RAS, Apatity

A modification of the technique for reconstructing concentrations of radiogenic helium in deep underground waters using quartz extracted from the drilled borehole core was developed and tested. In order to isolate the component of sample internal volume, stable at the temperature of the experiments, it was proposed to subject the samples to short-term preheating, at which inclusions opening at low temperatures should break down. The P_{He} values in the samples reconstructed in the course of the development of the samples indicate plausibility and good reproducibility of the results. The samples of quartz from the Kola Superdeep Borehole were also used to test the preliminary sorting of samples by recording the helium yield curves during linear heating of the sample. It is shown that in this way it is possible to choose potentially suitable samples, to diagnose the presence of gas-liquid decrepitating inclusions and helium sites that are not related to the crystal structure of quartz. Methodological considerations about planning such a research and methods of verification of the results are outlined.

Keywords: helium, groundwater, diffusion, isotopes, retention, residence time.

Введение

Изотопы гелия широко используются в качестве трассеров подземных вод по следующим причинам: 1) концентрации радиогенного He и изотопные отношения радиогенных и атмосферных изотопов, такие как $^4He/^{20}Ne$, могут пролить свет на возраст подземных вод (определенный как время пребывания воды на глубине, исключающей газообмен с атмосферой) и связанные с ним параметры [1]; 2) высокое содержание легкого изотопа 3He указывает на вклад мантийных летучих; 3) избыток $^3He(^3H)$ используется для измерения возраста молодых подземных вод (см. напр.

[12]). Такие исследования обычно основаны на прямых измерениях концентраций изотопов благородных газов в пробах подземных вод. Однако для глубинных вод измерения могут выполняться только в том случае, если отбор проб возможен, т. е. в изучаемых породах имеются водоносные горизонты, есть соответствующее оборудование и технология бурения позволяет производить отбор проб воды.

Метод реконструкции концентраций гелия в глубинных подземных водах, основанный на равновесии концентраций в системе «минерал — вода», позволяет реконструировать концентрации гелия в воде без не-

Для цитирования: Ганнибал М. А. Модификация метода реконструкции концентраций гелия в глубинных подземных водах // Вестник геонаук. 2020. 2(302). С. 3—10. DOI: 10.19110/geov.2020.2.1.

For citation: Gannibal M. A. Modified procedure of reconstruction of helium concentrations in deep groundwaters. Vestnik of Geosciences. 2020. 2(302). Pp. 3—10. DOI: 10.19110/geov.2020.2.1.

посредственного отбора воды. Метод был разработан и успешно апробирован на образцах кварца из пермокаменноугольной толщи в Швейцарии (далее — ПКТ) [3, 13, 16]. Полученные данные позволили проследить источники, пути миграции и время пребывания радиогенного гелия в осадочной толще и таким образом оценить нижнюю границу возраста воды в пределах исследуемого интервала глубин. В рамках метода было введено понятие эффективного внутреннего объема образца, доступного для гелия (далее — ДГО). Экспериментально установлено, что поведение гелия в ДГО (по крайней мере, в изученных образцах) удовлетворительно описывается уравнением состояния идеального газа, а распределение гелия между водой и ДГО контролируется законом Генри [16]. Методика эксперимента включает в себя оценку ДГО образца путем его насыщения гелием в контролируемых РТ-условиях, расчет начального давления гелия в этом объеме на основе прямых измерений концентраций гелия в исходном образце и, наконец, пересчет последнего значения в концентрацию гелия в воде с использованием данных о растворимости гелия. Однако попытка механического применения метода к другому геологическому объекту — разрезу Кольской сверхглубокой скважины — привела к неудовлетворительным результатам, в частности, парциальное давление гелия, реконструированное для ДГО нескольких навесок одного и того же образца, в некоторых случаях отличалось более чем на порядок.

Тем не менее концепция равновесных концентраций гелия в системе «минерал — флюид» представляется достаточно многообещающей, чтобы продолжить поиск адекватных экспериментальных методов ее исследования. Таким образом, целью настоящей работы является расширение области применения метода реконструкции концентраций гелия в подземных водах и выработка надежных критериев корректности полученных результатов.

Объект исследования

Применение вышеописанного метода к минералам из керна Кольской сверхглубокой скважины (далее — СГ-3) было обусловлено несколькими соображениями. Во-первых, этот метод наиболее оправдан для глубинных пород низкой проницаемости, в которых прямой отбор проб воды затруднен или невозможен, а сохранность радиогенного гелия достаточна для оценки времени его пребывания в изучаемом геологическом объекте. Разрез СГ-3 вполне соответствует этим критериям: результаты предыдущих исследований указывают на преимущественно радиогенное происхождение и высокие содержания гелия в породах и минералах разреза [1, 4]. В некоторых частях разреза также имеется слегка повышенное, по сравнению со среднекоровым, отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$, причем такое повышение характерно не для отдельных пород или минералов, а для определенных интервалов глубины. Это обстоятельство наряду с однородностью изотопного состава гелия, извлекаемого различными методами (дробление, плавление, ступенчатый нагрев), свидетельствует о доминирующем влиянии метаморфического флюида в прошлом и/или подземных вод в настоящем на формирование наблюдаемого распре-

деления изотопов гелия. Таким образом, разрез СГ-3 является перспективным объектом для изучения распределения изотопов гелия (а также U-He-системы в целом) не столько в породах как таковых, сколько в системе «вода — порода». Кроме того, получить экспериментальные данные о подвижности радиогенного гелия в системе «вода — порода» на глубине, превышающей 10 км, любым другим способом, кроме вышеупомянутого, весьма затруднительно.

Поскольку бурение СГ-3 прекратилось более четверти века назад, материал керна со временем становится все менее доступным. С другой стороны, уникальность данного объекта глубинного бурения обусловила его всестороннее исследование, в результате которого были опубликованы две монографии, а также многочисленные статьи, которые могут быть использованы в качестве ценного источника информации о составе пород, их физических свойствах и условиях залегания [1, 4, 6, 7].

Кварц в разрезе СГ-3 представлен жильными и пегматитовыми разностями; также он является одним из породообразующих минералов в гнейсах, широко распространенных в разрезе скважины. Практически все породы разреза в какой-то степени метаморфизованы. Степень метаморфизма увеличивается с глубиной от пренит-пумпеллитовой до амфиболитовой фаций.

В данной работе были использованы два образца кварца из керна СГ-3: 3803-2d (глубина 9860.8 м, 1 навеска) и 41305 (глубина 11352.2 м). Образец 38032-d был отобран из кварцевой жилы, а 41305 — из кварцевой составляющей пегматита.

Для сравнения и верификации полученных результатов были использованы четыре образца ПКТ: 1130.24, 1189.71, 1269.89 и 1389.67. Образцы представляют собой концентрат кварца, выделенного из песчаников, и содержат не более 1 % примесей других минералов. Номер образца соответствует глубине отбора исходного фрагмента керна.

Различие между обломочным кварцем из осадочных пород ПКТ, первоначально использовавшихся для реконструкции концентраций гелия в подземных водах, и кварцем из разреза СГ-3 (в основном из жил и пегматитов) в первую очередь и объясняет несогласованность полученных результатов. Предыдущие исследования показали, что при ступенчатом нагреве одного из образцов жильного кварца из разреза СГ-3 (обр. 42057; глубина 11.6 км) гелий начинает выделяться при температуре по меньшей мере на 150–200 °C ниже, чем из обломочного кварца ПКТ [2]. Кривые изотермического нагрева образцов из разреза СГ-3 до и после насыщения гелием (которое также связано с прогревом) существенно различаются между собой. В частности, после импрегнации образцов гелием существенно (~ в 1.5–2.5 раза) сокращается доля гелия, выделившаяся в течение первого часа прогрева. Для сравнения, в образцах кварца из ПКТ эта разница составляет в среднем около 15 %, причем «первая порция» импрегнированного гелия может быть в процентном отношении как больше, так и меньше таковой исходного образца. Такое положение вещей позволяет предположить, что на начальном этапе прогрева исходных образцов, будь то экстракция или насыщение, происходит необратимое разру-

шение части ДГО. Поскольку ДГО представлен главным образом флюидными включениями [3, 16], это явление, по всей видимости, связано с декрепитацией части включений при температуре опыта.

Методика эксперимента

Ввиду сравнительно крупного размера зерен кварца в исходных образцах и уникального характера и, соответственно, дефицита образцов, материал для анализа отбирался вручную. Ручное измельчение фрагментов зерна чередовалось с отбором чистого кварца и просеиванием. Чтобы обеспечить максимальный выход полезного материала, цикл «измельчение — отбор — просеивание» был повторен несколько раз. Для анализа использовалась фракция кварца 0.25–0.63 мм, которая была дополнительно очищена от примесей под бинокулярным микроскопом.

Чтобы выделить составляющую ДГО, стабильную при температуре 300–400 °С, при которой гелий полностью выделяется из образца в течение приемлемого промежутка времени (в пределах недели), были предложены следующие способы:

1) подвергнуть образцы кварца кратковременному предварительному нагреву: в исходных образцах при этом должны разрушиться включения, вскрывающиеся при низких температурах. Однако, учитывая, что параллельно с декрепитацией из образца теряется также «диффузионный» гелий, образцы, насыщенные гелием, следует прогреть аналогичным образом, что-

бы максимально возможно воспроизвести условия дегазации (обеспечить эквивалентные потери гелия путем диффузии);

2) выполнить предварительную сортировку образцов с помощью линейного нагрева. Исследование мест нахождения благородных газов (в частности, гелия) в природных минералах [9, 18] показали хорошую информативность метода. При достаточной скорости нагревания этот метод позволяет наблюдать высвобождение гелия из разных мест нахождения и получить приблизительное представление о подвижности гелия в каждой позиции.

Таким образом, основные методики экстракции гелия из образцов в рамках данного исследования — линейный и изотермический (низкотемпературный) нагревы образцов. Дополнительно был выполнен анализ гелия, извлеченного из образцов деструктивными методами (дробление и плавление).

Для изотермического нагрева использовались сравнительно большие навески, около четверти грамма (см. таблицу). Нагрев осуществлялся в тигле из нержавеющей стали при помощи электропечи с терморегулятором «Термодат», позволяющей поддерживать температуру образца с точностью ± 2 °С. Такая методика предусматривает длительную выдержку образцов при умеренных постоянных температурах (~300–400 °С) без его разрушения, что позволяет использовать одну и ту же навеску для извлечения исходного и внедренного гелия.

Плавление образцов осуществлялось при помощи высокотемпературной электропечи с двухсторонней откачкой при температуре 1600–1750 °С, которая обеспечивает полное извлечение благородных газов из образца.

Для извлечения газов дроблением образец помещался в стеклянную ампулу вместе с мелющими те-

Рис. 1. Концентрации гелия в природных водах: а — распределение концентраций гелия в подземных водах мира, согласно базе данных [15], общее количество образцов — 540 и результаты реконструкции концентраций гелия в подземных водах ПКТ с использованием навесок кварца [5]; б — единичные образцы воды, в которых измерены наиболее высокие концентрации гелия и концентрации, реконструированные в подземных водах разреза СГ-3

Fig. 1. Concentrations of helium in natural groundwaters: a — the distribution of helium concentrations in the groundwater of the world, according to the database [15], the total number of samples — 540 and the results of the reconstruction of helium concentrations in the groundwater of PCT using quartz samples [5]; б — single water samples in which the highest record helium concentrations were registered and concentrations reconstructed in the groundwater of the SG-3 section

Рис. 2. Концентрации гелия в водах разреза ПКТ: 1 — результаты реконструкции концентраций гелия в подземных водах ПКТ с использованием навесок кварца по оригинальной методике [5]; 2 — результаты прямых измерений [16]; 3 — результаты, полученные с использованием новой модификации методики реконструкции (данные автора)

Fig. 2. Concentrations of helium in the waters of the PCT section. 1 — the results of the reconstruction of the concentrations of helium in groundwater PCT using quartz samples according to the original method [5]; 2 — the results of direct measurements; 3 — results obtained using a new modification of the reconstruction technique (this work)

лами (стальными шариками), откачивался, после чего вакуумированная ампула отпаивалась. После этого ампула подвергалась воздействию вибрации в течение 20 мин. Характерный линейный размер частиц после дробления не превышал 0.05 мм.

Процедура нагрева образцов в вакууме с линейным повышением температуры и одновременной регистрацией ионного тока ${}^4\text{He}^+$ (линейный нагрев) осуществлялась в динамическом режиме (под откачкой). Навески образцов (около 50 мг) помещали в тигель из нержавеющей стали и нагревали с помощью печи сопротивления с платиновым нагревателем; скорость нагрева контролировалась регулятором «Термодат» с Pt-Pt-Rh-термопарой. В системе напуска гелия использовалась ловушка для угля, охлаждаемая жидким азотом. Максимальная температура опыта — 1100 °С. Регистрация ионного тока ${}^4\text{He}^+$ при линейном нагреве осуществлялась на масс-спектрометре МИ-1201 при помощи умножителя.

Содержания и изотопный состав гелия также измерялись на масс-спектрометре МИ-1201. Методика масс-спектрометрического анализа гелия детально описана в статье [13]. Чувствительность по гелию составляла 5×10^{-5} А торр $^{-1}$. Концентрации ${}^4\text{He}$ определялись методом высоты пика с погрешностью $\pm 5\%$ (1σ). Количества ${}^4\text{He}$ в холостых опытах не превышали 4×10^{-14} моль. Все анализы были выполнены в Геологическом институте КНЦ ФИЦ РАН, г. Апатиты.

Для насыщения образцов был использован специально сконструированный тигель, способный выдерживать давление до 150 атмосфер при температуре до 600 °С. В этот тигель загружались образцы, затем туда подавался гелий из баллона (${}^3\text{He}/{}^4\text{He} \sim 10^{-8}$) через редуктор, понижающий давление до заданного значения (около 30 атмосфер). Затем тигель нагревался до требуемой температуры (обычно около 300°). Температура и давление гелия в тигле поддерживались на одном уровне в течение всего эксперимента с точностью ± 4 °С и ± 0.25 атм. соответственно. Длительность насыщения была подобрана экспериментально и составляла около 1000 часов.

Результаты и обсуждение

Как было сказано выше, наиболее вероятной причиной хаотичных результатов реконструкции парциального давления гелия в ДГО образцов является нестабильность части флюидных включений, которые, как было показано предыдущими исследованиями, составляют подавляющую часть ДГО [2, 16]. Чтобы исключить эту нестабильную часть, было предложено не рассматривать долю гелия, выделившуюся в течение фиксированного интервала времени (один час) в начале изотермического прогрева (общая продолжительность каждого эксперимента составляет 100—150 часов).

Такая процедура была применена к двум образцам керна СГ-3: 38032d (глубина 9860.8 м, 1 навеска) и 41305 (глубина 11352.2 м, 2 навески). Реконструированные значения P_{He} в образцах составили 1.58 атм. для образца 38032d и 1.17; 1.44 для двух навесок образца 41305. Ранее, при механическом применении предыдущей версии метода к этим образцам с использованием деструктивных методов извлече-

ния гелия (дробление и плавление), для этих образцов были получены значения 2.59; 2.64 и 3.38; 11.20 атм. соответственно (см. таблицу). Вторая пара значений наглядно иллюстрирует несостоятельность исходной версии метода применительно к образцам разреза СГ-3.

Таким образом, предложенный методологический прием позволил получить весьма близкие значения парциальных давлений гелия в ДГО образцов, свидетельствующие об удовлетворительной воспроизводимости экспериментов. Для сравнения, среднее значение давления гелия в ДГО образцов кварца из осадочных пород ПКТ в интервале глубин 1130—2012 м составило 0.49 атм.

Чтобы вычислить равновесную концентрацию гелия в воде, необходимо знать температуру и соленость воды, а также растворимость гелия при данных условиях. Температура в стволе скважины составляет в данном интервале глубин примерно 200 °С. Вопрос о солёности пока остается открытым; прямые измерения на таких глубинах невозможны, обсуждение косвенной оценки выходит за рамки данной работы. Более или менее современных данных о растворимости гелия в воде при 200 °С найти не удалось. Наиболее релевантные данные были опубликованы в монографии [10] со ссылкой на другие источники. Согласно этим данным, растворимость гелия в пресной воде при $T \sim 200$ °С составляет 3.1×10^{-2} [см 3 СТД / г(H_2O) атм.]. При повышении солёности до 1 г-экв (NaCl)/л (~ 58 г/л) при температуре 160 °С растворимость гелия убывает на 25 %. Оценка концентрации гелия в подземных водах была выполнена с использованием данных о растворимости гелия в пресной воде при $T \sim 200$ °С. Из вышесказанного следует, что это максимально возможная концентрация гелия в воде, равновесная с давлением, полученным для ассоциированной газовой фазы. Эти данные наряду с концентрациями гелия в природных водах, измеренными по всему миру [15], реконструированными значениями подземных вод в ПКТ [3] и несколькими рекордными значениями представлены на рисунке 1. Можно видеть, что полученные значения близки к рекордным измеренным значениям концентраций гелия, однако не превышают их.

Предложенная методика основывалась на следующих допущениях: 1) нестабильная часть ДГО представлена вторичными газово-жидкими включениями, которые полностью разрушаются при рабочей температуре изотермического нагрева (350 °С) в течение часа; 2) длительный прогрев, которому образец неизбежно подвергается как в ходе насыщения образцов гелием, так и при его экстракции, существенно не влияет ни на скорость диффузии гелия из образца, ни на объем оставшейся «стабильной» части ДГО.

Поскольку ни одно из допущений не поддается прямой экспериментальной проверке, методика была также опробована на образцах обломочного кварца из ПКТ. Для этих образцов есть данные реконструкции концентраций гелия по оригинальной методике, а также данные прямых измерений концентраций гелия в воде [14]. Эти данные представлены на рисунке 2 и в таблице; можно видеть, что они не сильно отличаются от полученных ранее. Фактически среднее расхождение концентраций гелия, полученных в со-

**Сопоставление результатов реконструкции давления гелия в ДГО кварца при помощи оригинальной методики [3—5]
и ее модифицированной версии, представленной в настоящей работе**

**Comparison of the results of reconstruction of the pressure of helium in the apparent helium-accessible volume of quartz samples using the original technique [3—5]
and its modified version presented in this paper**

Образец Sample	Объект Object	Описание образца Description	Глубина, м Depth, m	$^4\text{He}_{\text{ИСХ}}$ $\times 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	$(^4\text{He}_{(1-\text{й час})}/^4\text{He}_{\Sigma})_{\text{ИСХ}}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$ $\times 10^{-8}$	$^4\text{He}_{\text{НАС}}$ $\times 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$	$(^4\text{He}_{(1-\text{й час})}/^4\text{He}_{\Sigma})_{\text{ИСХ}}$	P_{He} (ориг) [атм]	P_{He} (нов), [атм]
38032d	СГ-3	Qz-жила в Ti-Amf-Pf сланце Qz-ein in Ti-Amf-Pf shale	9860.8	121.1	0.76	5.4	823	0.46	3.61 2.59 _{ДР} ; 2.64 _{ПЛ}	1.58
41305	СГ-3	Пегматит преимущественно Qz-состава) Pegmatite of Qz-composition	11352.2	28.2	0.65	2.9	296.2 238.1	0.26 0.24	2.50 3.16 3.38 _{ДР} ; 1.20 _{ПЛ}	1.17 1.44
1130.24	ПКТ	Qz-зерна в песчанике Qz-grain in sandstone	1130.24	56.3	0.45	10.0	5556	0.53	0.19	0.22
1189.71	ПКТ	Qz-зерна в песчанике Qz-grain in sandstone	1189.71	109	0.25	10.0	10130	0.40	0.23	0.30
1269.89	ПКТ	Qz-зерна в песчанике Qz-grain in sandstone	1269.89	77.4	0.36	9.5	6603	0.46	0.22	0.26
1389.67	ПКТ	Qz-зерна в песчанике Qz-grain in sandstone	1389.67	106.8	0.40	9.2	5817	0.36	0.34	0.32

Примечание: значения без индексов относятся к опытам изотермического отжига; индексы ДР и ПЛ — к дроблению и плавлению соответственно.

Note: values without indices relate to the isothermal heating runs. ДР and ПЛ indices relate to crushing and fusion respectively.

ответствии со старой и новой версиями методики, составило 20 %.

Разумно предположить, что все флюидонасыщенные включения разрушаются в течение первого часа прогрева, но могут быть и другие процессы, влияющие, возможно в решающей степени, на результаты реконструкции. Например, наряду с разрушением ДГО может произойти его увеличение из-за утечки жидкости, содержащейся во флюидных включениях без разрушения последних и, соответственно, увеличения доли объема газовой фазы (относительно жидкой фазы). Поскольку объем жидкости входит в объем ДГО с коэффициентом H (константа Генри, или растворимость гелия в жидкости), которая составляет около 0.01 в пресной воде, а в рассолах — около 0.001, такая утечка может критически повлиять на измеренный объем ДГО. Кроме того, длительная выдержка образцов при температуре 350 °С (рабочая температура экспериментов по изотермическому нагреву) может повлиять на их проницаемость для гелия. Поэтому необходим некоторый эмпирический критерий достоверности восстановления значений P_{He} в ДГО образцов.

Самый простой способ достичь определенной уверенности в правильности результатов состоит в том, чтобы реконструировать парциальное давление гелия в нескольких образцах кварца с близких глубин или даже нескольких навесках одного и того же образца. Относительный объем включений, с учетом той его доли, в которой ДГО может подвергаться необратимым изменениям, является индивидуальным параметром не только для разных образцов, но и для разных навесок, следовательно, он также является основным источником возможной ошибки. Поэтому совпадение P_{He} для нескольких опытов будет свидетельствовать о правильности результатов.

Было бы еще надежнее сравнить результаты реконструкций P_{He} в различных минералах, поскольку в отличие от разреза ПКТ другие геологические объекты (включая СГ-3) могут содержать их в достаточных количествах.

Пригодность минерала для восстановления концентраций гелия в окружающих подземных водах определяется по ряду критериев [16]. Чтобы доказать, что кварц ПКТ соответствует этим критериям, потребовалось немало усилий. Наличие внедренного гелия в кварце песчаников ПКТ было установлено более или менее случайно [17] и обусловило разработку метода реконструкции концентрации гелия в подземных водах (а не наоборот). Если речь идет о выборе подходящего минерала из многих, основным критерием такого выбора, по-видимому, является чрезвычайно плохая сохранность захваченного гелия в выбранном минерале.

Выбор подходящего минерала может быть основан на расчете ионной пористости данного минерала [11] или просто на общих соображениях, однако из предыдущего опыта очевидно, что даже один и тот же минерал может реагировать на длительный прогрев по-разному. Поэтому образцы минеральных концентратов для исследования должны быть каким-то образом предварительно разбракованы. Вероятно, наиболее подходящим для этого является метод линейного нагрева (см. раздел «Методика эксперимента»).

До настоящего времени такие эксперименты были проведены только для нескольких образцов кварца из разреза СГ-3 (рис. 3). Сравнение этих кривых между собой, а также с аналогичной кривой, полученной для навески обломочного кварца из песчаника ПКТ (кривая 1 на рис. 3) позволяет выбрать потенциально подходящие образцы (кривая 2) хотя бы по принципу наибольшего соответствия. Также методика позволяет диагностировать наличие декрепитирующих (вторичных) газовой-жидких включений (кривая 3) или мест нахождения гелия, не связанных с кристаллической структурой кварца (предположительно восток другого минерала — кривая 4). Таким образом, линейный нагрев представляется перспективным методом предварительной разбраковки образцов.

Рис. 3. Кривые высвобождения гелия при линейном нагреве образцов кварца: 1 — образец 1269.89, ПКТ; 2—4 — образцы кварца из разреза СГ-3: 2 — обр. 38032-д (глуб. 9860 м, жильный кварц), 3 — обр. 42057 (гл. 11614 м, выделен из гнейса), 4 — обр. 23341 (глуб. 7200 м, жильный кварц)

Fig. 3. Helium release curves for linear heating of quartz samples. 1 — sample 1269.89, PCT; 2—4 — samples from the SD-3 section: 2 — sample 38032-d (depth 9860 m, quartz vein), 3 — sample 42057 (depth 11614 m, quartz from gneiss), 4 — sample 23341 (depth 7200 m, quartz vein)

Закключение

Метод реконструкции концентраций гелия в глубинных подземных водах, основанный на равновесии концентраций в системе «минерал — вода», был модифицирован применительно к минералам из керна разреза Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3). Чтобы выделить составляющую ДГО, стабильную при температуре опытов, было предложено подвергать образцы кратковременному предварительному прогреву, при котором должны разрушиться включения, вскрывающиеся при низких температурах.

Разработанная процедура была применена к трем навескам двух образцов. Реконструированные значения P_{He} в образцах составляли 1.58 и 1.17, 1.44 атм. для образцов 38032д и 41305 соответственно — это весьма близкие значения, свидетельствующие о хорошей воспроизводимости результатов экспериментов. Оценка концентрации гелия в подземных водах показала, что полученные значения близки к рекордным

значениям концентраций гелия, измеренным в природных водах.

На образцах кварца из керна СГ-3 была также протестирована методика предварительной сортировки образцов при помощи регистрации кривых выхода гелия в ходе линейного нагрева образца. Показано, что таким образом можно выбрать потенциально подходящие образцы, диагностировать наличие декрепитирующих газово-жидких включений и мест нахождения гелия, не связанных с кристаллической структурой кварца.

Работа выполнена в рамках Госзадания ГИ КНЦ РАН (тема № 0226-2019-0052) при поддержке гранта РФФИ «Ресурсы Арктики», проект №18-05-70004.

Литература

- Архейский комплекс в разрезе СГ-3. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1991. 185 с.
- Ганнибал М. А. Происхождение и миграция благородных газов в системе «вода — порода»: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ГЕОХИ, 2012. 114 с.
- Ганнибал М. А. Равновесное распределение гелия в системе «вода — порода»: новые возможности датирования древних подземных вод // Геохимия. 2012. № 1. С. 1—12.
- Икорский С. В., Каменский И. Л., Смирнов Ю. П. Изотопы гелия в разрезе Кольской сверхглубокой скважины // Докл. РАН. 1994. Т. 335. № 1.
- Каменский И. Л., Толстухин И. Н., Шарков И. В., Пушкарев Ю. Д. Первые результаты измерения изотопного состава гелия на однокаскадном масс-спектрометре МИ-1201 // Геохимия. 1984. № 3. С. 439—443.
- Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины. М.: Недра, 1984. 490 с.
- Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследования // М.: МФ «Технонефтегаз», 1998. 260 с.
- Савченко В. П. К вопросу о геохимии гелия // Природные газы. 1935. № 9. С. 53—108.
- Толстухин И. Н., Скиба В. И., Севостьянов А. Ю., Каменский И. Л., Ветрин В. Р. Места нахождения и происхождение благородных газов в минералах (на примере ильменита из щелочных гранитов Кольского полуострова) // Геохимия. 2014. № 12. С. 1099—1107.
- Якуцени В. П. Геология гелия. Л.: Недра, 1968. 232 с.
- Dowty E. Crystal-chemical factors affecting the mobility of ions in minerals // American mineralogist. 1980. V. 65. P. 174—182.
- Kamensky I. L., Tokarev I. V., and Tolstikhin I. N. $3\text{H}-3\text{He}$ dating: A case for mixing of young and old groundwaters // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. V.55, P. 2895—2899
- Lehmann B., Waber N., Tolstikhin I., Kamensky I., Gannibal M., Kalashnikov E., and Pevzner B. Helium in solubility equilibrium with quartz and porefluids in rocks: A new approach in hydrology // Geophys. Res. Lett. 2003a. V. 30. N. 3. P.1128(1—3).
- Pearson F. J., Balderer W., Loosli H. H., Lehmann B. E., Matter A., Peters T., Schmassmann H., Gautschi A. Applied isotope hydrogeology - A case study in Northern Switzerland. Amsterdam, Elsevier Science Publisher. 1991. 439 p.
- Polyak, B. G., Prasolov E. M., Tolstikhin I. N., Yakovlev L. E., Ioffe A. I., Kikvadze O. E., Vereina O. B., Vetrina M. A.

NobleGasIsotopeDataBase — Url: <http://data.deepcarbon.net/can/dataset/523f4bf3-5de4-4c30-9c62-34af0dc62f70>

- Tolstikhin I. N., Gannibal M., Tarakanov S., Pevzner B., Lehmann B. E., Ihly B., Waber H. N. Helium transfer from water into quartz crystals: A new approach for porewater dating. // Earth Planet. Sci. Lett. 2005. V. 238. P. 31—41.
- Tolstikhin I. N., Lehmann B. E., Loosli H. H., Gautschi A. Helium and argon isotopes in rocks, minerals and related groundwaters: A case study in Northern Switzerland. // Geochim. Cosmochim. Acta. 1996. V. 60, P. 1497—1514.
- Tolstikhin I. N., Verchovsky A. B., Kamensky I. L., Skiba V. I., Gannibal M. A., Vetrin V. R. Amphibole: a major carrier of helium isotopes in crustal rocks // Chem. Geol. 2016. 444. 187—198.

References

- Arkheyskiy kompleks v razreze SG-3* (Archean complex in SG-3 section). Apatity: KSC RAS, 1991, 185 p.
- Gannibal M. A. *Proiskhozhdeniye i yemigratsiya blagorodnykh gazov v sisteme voda — poroda* (Origin and emigration of noble gases in water-rocks system). PhD dissertation. GEOKHI, Moskva, 2012, 114 p.
- Gannibal M. A. *Ravnovesnoye raspredeleniye geliya v sisteme voda — poroda: novyye vozmozhnosti datirovaniya drevnykh podzemnykh vod* (Equilibrium distribution of helium in water-rocks system: new horizons for dating of old subwaters). *Geokhimiya*, 2012, No. 1, pp.1—12
- Ikorskiy S. V., Kamenskiy I. L., Smirnov YU. P. *Izotopy geliya v razreze Kolskoy sverkhglubokoy skvazhiny* (Helium isotopes in section of Kola super deep borehole). *Doklady Earth Sciences*, 1994, V. 335, No. 1.
- Kamenskiy I. L., Tolstikhin I. N., Sharkov I. V., Pushkarev YU. D. *Pervyye rezultaty izmereniya izotopnogo sostava geliya na odnokaskadnom mass-spektrometre MI-1201* (First results of isotope composition study by monocascade mass-spectrometer MI—1201). *Geokhimiya*, 1984, No.3, pp.439—443.
- Kolskaya sverkhglubokaya. Issledovaniye glubinnogo stroeniya kontinentalnoy kory s pomoshchyu bureniya Kolskoy sverkhglubokoy skvazhiny* (Kola superdeep borehole. Researches of structure of continental crust with the help of Kola superdeep borehole). Moscow: Nedra, 1984, 490 p.
- Kolskaya sverkhglubokaya. Nauchnyye rezultaty i opyt issledovaniya* (Kola superdeep borehole. Science results and research experience). Moscow: Tekhnoneftegaz, 1998, 260 p.
- Savchenko V. P. *K voprosu o geokhimii geliya* (Helium geochemistry). *Prirodnyye gazy*, 1935, No. 9, pp. 53—108.
- Tolstikhin I. N., Skiba V. I., Sevostyanov A. Yu., Kamenskiy I. L., Vetrin V. R. *Mesta nakhozhdeniya i proiskhozhdeniye blagorodnykh gazov v mineralakh (na primere ilmenita iz shchelochnykh granitov Kolskogo poluostrova)* (Location and origin of noble gases in minerals (example of ilmenite from alkaline granites of Kola peninsula)). *Geokhimiya*, 2014, No. 12, pp.1099—1107.
- Yakutseni V. P. *Geologiya geliya* (Helium geology). Leningrad: Nedra, 1968, 232 p.
- Dowty E. Crystal-chemical factors affecting the mobility of ions in minerals. *American mineralogist*, 1980, V. 65, pp. 174—182
- Kamensky I. L., Tokarev I. V., and Tolstikhin I. N. $3\text{H}-3\text{He}$ dating: A case for mixing of young and old groundwaters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, V. 55, pp. 2895—2899
- Lehmann B., Waber N., Tolstikhin I., Kamensky I., Gannibal M., Kalashnikov E., and Pevzner B. Helium in solu-

bility equilibrium with quartz and porefluids in rocks: A new approach in hydrology. *Geophys. Res. Lett.* 2003a, V. 30, No.3, pp.1128(1—3).

14. Pearson F. J., Balderer W., Loosli H. H., Lehmann B. E., Matter A., Peters T., Schmassmann H., Gautschi A. *Applied isotope hydrogeology- A case study in Northern Switzerland.* Amsterdam, Elsevier Science Publisher, 1991, 439 p.

15. Polyak, B. G., Prasolov E. M., Tolstikhin I. N., Yakovlev L. E., Ioffe A. I., Kikvadze O. E., Vereina O. B., Vetrina M. A. Noble Gas Isotope Data Base — Url: <http://data.deepcarbon.net/ckan/dataset/523f4bf3-5de4-4c30-9c62-34af0dc62f70>

16. Tolstikhin I. N., Gannibal M., Tarakanov S., Pevzner B., Lehmann B. E., Ihly B., Waber H. N. Helium transfer from

water into quartz crystals: A new approach for porewater dating. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2005, V. 238, pp.31—41.

17. Tolstikhin I. N., Lehmann B. E., Loosli H. H., Gautschi A. Helium and argon isotopes in rocks, minerals and related groundwaters: A case study in Northern Switzerland. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1996, V.60, pp.1497—1514.

18. Tolstikhin I. N., Verchovsky A. B., Kamensky I. L., Skiba V. I., Gannibal M. A., Vetrin V. R. Amphibole: a major carrier of helium isotopes in crustal rocks. *Chem. Geol.*, 2016, 444, pp. 187—198.

Поступила в редакцию / Received 16.04.2019