ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДА РЕКОНСТРУКЦИИ КОНЦЕНТРАЦИЙ ГЕЛИЯ В ГЛУБИННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ (НА ПРИМЕРЕ РАЗРЕЗА СГ-3)

Ганнибал М.А.

Геологический институт КНЦ РАН, Анатимы, m.a.gannibal@gmail.com

Результаты проведенных ранее исследований распространенности и изотопного состава гелия в породах и минералах Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) указывают на преимущественно радиогенное происхождение гелия и относительно хорошую его сохранность [1-3]. В некоторых частях разреза наблюдается также несколько повышенное, по сравнению со среднекоровым, отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$, причем таким повышением характеризуются не отдельные породы или минералы, а именно определенные интервалы глубины. Такое положение вещей, вкуче с единообразием изотопного состава гелия, извлеченного различными методами (дробление, плавление, ступенчатый нагрев) говорит о доминирующем влиянии метаморфического флюида в прошлом и/или подземных вод в настоящем на формирование наблюдаемого распределения изотопов гелия. В связи с этим разрез СГ-3 представляется 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.

Метод реконструкции концентраций гелия в подземных водах, основанный на (подтвержденном) предположении о равновесии концентраций гелия во внутреннем объеме кварца, доступном для гелия (ДГО) и окружающей воде, был разработан нашим исследовательским коллективом совместно со швейцарскими коллегами [6] и успешно опробован на материале керна скважины, пробуренной в породах осадочной впадины пермо-карбонового возраста (Швейцария). Полученные данные позволили отследить источники, пути миграции и времена пребывания радиогенного гелия в пределах изученного интервала глубин, и сделать вывод о пригодности полигона для захоронения высокотоксичных и радиоактивных отходов. По существу, метод заключается в оценке внутреннего объема образца, доступного для гелия (при помощи насыщения образцов гелием в контролируемых Р-Т условиях), оценке давления гелия в этом объеме (на основании прямых измерений концентраций гелия в исходных образцах) и, наконец, в расчете концентраций гелия в воде (на основании данных о растворимости гелия).

Перспектива применения такого подхода к изучению разреза СГ-3 представляется наиболее верным способом получить экспериментальные данные о подвижности радиогенного гелия в системе вода-порода на столь значительных глубинах.

Первые попытки такого рода были предприняты практически в ходе разработки метода. Результаты, однако, получились невнятными: рассчитанные значения парциального давления гелия (P_{He}) в ДГО оказались хаотичными; результаты нескольких опытов с одним образцом, как правило, не сходились. Наиболее вероятной причиной неудачи были существенные отличия кварца из разреза СГ-3 от кварца из осадочных пород. Последние представляют собой обломочный кварц, тогда как образцы из разреза СГ-3 представлены, главным образом, кварцем из жил и пегматитов. По данным ступенчатого отжига, выполненного для одного из этих образцов, гелий из жильного кварца начинает выделяться при температуре, как минимум, на 150-200°C ниже, чем из обломочного кварца песчаников. Причиной этого, по-видимому, является декрепитация флюидонасыщенных включений, нестабильных в данном интервале температур. Таким образом, часть ДГО разрушается при первом прогреве образца, будь то экстракция гелия из образца или насыщение навески гелием. На этом же этапе исследований было установлено, что, наряду с разрушением ДГО может наблюдаться его увеличение, предположительно, вызванное утечкой части содержимого флюидных включений и, соответственно, увеличением в них доли объема газовой фазы (по отношению к жидкой). Поскольку объем жидкости входит в ДГО с множителем Н (постоянная Генри, или растворимость гелия в жидкости), составляющим в пресной воде около 0.01, а в рассолах около 0.001, такая утечка может критически повлиять на измеренный объем ДГО. Следует также иметь в виду, что оба процесса (декрепитация включений и утечка их содержимого) могут происходить в одном и том же образце, так что об изменениях, которые претерпевает исходный ДГО в ходе экспериментов вооб-

ще сложно что-либо сказать. Таким образом, методика, разработанная для кварца из осадочных пород не подходит для пород разреза СГ-3, и скорее всего, для многих других случаев предполагаемого равновесия концентраций гелия в системе кварц – вода, однако сама концепция такого равновесия кажется достаточно перспективной для того чтобы продолжать поиски адекватных экспериментальных методов ее исследования.

Чтобы отыскать и выделить в образцах кварца компоненту ДГО, устойчивую при температуре около 300-400°C, при которой гелий полностью высвобождается из образца в течение приемлемого временного интервала (в пределах недели), были предложены следующие способы:

1. Использовать для опытов более мелкую фракцию образцов. Идея состояла в том, чтобы заранее разрушить наиболее крупные флюидные включения, которые, во-первых, вносят наибольший

Рис. 1. Извлечение гелия из крупно- и мелкозернистой фракций образца кварца № 42057, разрез СГ-3, методом линейного нагрева.

вклад в ДГО образца (а также в его неоднородность), а во-вторых, в наибольшей степени подвержены декрепитации. Этот способ, хотя и определенно способствует в некоторых случаях разрушению части декрепитирующих включений (рис.1) не внушает особого оптимизма, так как первоначально проведенные опыты методологически как раз и представляли собой либо дробление (извлечение гелия из крупных включений) либо плавление тонкозернистого порошка, полученного в ходе дробления. Последние опыты от предлагаемых отличает только то, что раз-

рушение крупных включений происходило после насыщения гелием, а не до него, что едва ли могло принципиально что-то изменить. Как говорилось выше, результаты этих опытов были неудовлетворительными.

2. Подвергать образцы кварца предварительному краткосрочному прогреву: исходные образцы – для того, чтобы разрушить включения, декрепитирующие при низких температурах, насыщенные гелием – для того, чтобы создать одинаковые условия дегазации (так как при прогреве исходных образцов, наряду с разрушением включений происходит также диффузия гелия из неповрежденной части ДГО). Этот способ был опробован для образцов 38032d (глубина отбора 9860.8 м, 1 опыт) и 41305 (глубина отбора 11352.2 м, 2 опыта). В этих опытах гелий извлекался из образцов путем изотермического нагрева; порции гелия, выделившиеся в течение первого часа прогрева (суммарная длительность каждого опыта составляла 100..150 часов) из всех образцов были исключены из рассмотрения. Реконструированные значения P_{He} во внутреннем объеме образцов составили (1.58) и (1.17; 1.44) атм. для образцов 38032d и 41305, соответственно. При использовании разрушающих методов экстракции гелия (дробления и плавления) для этих образцов были получены значения (2.59; 2.64) и (3.38; 11.20) атм, соответственно. Для сравнения, среднее значение давления гелия в ДГО кварца из осадочных пород (см. выше) в интервале глубин 1130-2012 м составило 0.49 атм. Таким образом, полученные значения P_{He} показывают значительно меньший разброс и достаточно правдоподобны. С другой стороны, сам по себе способ не предоставляет возможности выяснить, как полученные значения соотносятся с реальными. Можно вполне обоснованно предположить, что все декрепитирующие включения разрушаются в течение первого часа прогрева, однако если имеет место частичная утечка содержимого включений без их разрушения, расчетные значения P_{He} (и, соответственно, его концентрации в подземных водах) будут необратимо занижены. Длительная выдержка образцов при температуре 350°C (рабочая температура опытов изотермического нагрева) также может повлиять на их проницаемость для гелия. Вообще говоря, моде-

Рис. 2. Результаты линейного нагрева образцов кварца из разреза СГ-3 (а-в) и из песчаника (Швейцария, г). По оси ординат – поток ^4He , произвольные единицы.

однако из песчаников этой толщи не удалось извлечь в достаточном количестве ничего кроме кварца.

Пригодность того или иного минерала для реконструкций концентраций гелия в окружающих подземных водах определяется рядом критериев [6]; доказательство того, что обломочный кварц соответствует этим критериям было весьма трудоемким. Кроме того, наличие в кварце песчаников внедренного гелия было установлено более или менее случайно [5], и явилось толчком к разработке метода оценки концентраций гелия в воде (а не наоборот). Если же речь идет о том, чтобы выбрать подходящий минерал из многих, первичным критерием такого выбора, по-видимому, должна стать крайне плохая сохранность захваченного гелия в выбранном минерале, что представляет собой известное затруднение, поскольку традиционно в изотопной геохимии гелия ценится его *хорошая* сохранность и объектом исследования становятся соответствующие минеральные виды.

Исследования мест нахождения благородных газов (в частности, гелия) в природных минералах, проведенные нашим коллективом в последние годы [4, 7], показали хорошую информативность метода линейного нагрева образца с одновременной регистрацией тока $^4\text{He}^+$ на масс-спектрометре в динамическом режиме (в частности, результаты таких опытов представлены на рис.1). При достаточной скорости нагрева этот метод позволяет наблюдать процесс высвобождения гелия из разных мест нахождения, которые, как правило, соответствуют разным пикам выхода гелия, а также составить приблизительное представление о его подвижности и, что немаловажно, позволяет сделать это достаточно быстро. Пока что такие опыты были выполнены только для нескольких образцов кварца из разреза СГ-3 (рис. 2). Сопоставление этих кривых между собой, а также с аналогичной кривой, полученной для образца швейцарского обломочного кварца (рис. 2 г) позволяет, по принципу наибольшего соответствия, отобрать потенциально пригодные образцы (рис. 2 б), зафиксировать пониженную проницаемость образца (рис 2 а), наличие декрепитирующих включений (рис. 1), или еще одного места нахождения гелия (предположительно, примеси другого минерала, рис. 2 в). Таким образом, линейный нагрев представляется наиболее приемлемым способом первичной разбраковки образцов.

Работа выполнена в рамках темы НИР ГИ КНЦ РАН № 0231-2015-0012.

лирование процессов, происходящих в природе, требует сильного их упрощения, а на результаты лабораторных опытов могут оказывать влияние любые факторы, независимо от того, находятся ли они в рамках модели или за рамками. Таким образом, необходим какой-либо эмпирический критерий достоверности реконструкции значений P_{He} в ДГО. Ниже изложены возможные пути верификации полученных результатов.

Один из таких путей заключается в анализе нескольких образцов кварца с близких глубин или даже нескольких навесок одного образца. Относительный объем включений, в том числе той их части, за счет которой ДГО может претерпеть необратимые изменения является индивидуальным параметром не только для разных образцов, но и для разных навесок. При этом, предположительно, он же является главным источником возможной ошибки. Поэтому совпадение P_{He} для нескольких образцов будет свидетельствовать в пользу правильности таких результатов.

Еще надежнее было бы сопоставить результаты реконструкции P_{He} в разных минеральных видах. Такое предложение было высказано еще в ходе отработки метода на породах швейцарской осадочной толщи,

Литература

1. Архейский комплекс в разрезе СГ-3. Апатиты. 1991. 185 с.
2. Икорский С.В., Каменский И.Л., Смирнов Ю.П. Изотопы гелия в разрезе Кольской сверхглубокой скважины // Докл. РАН. 1994. Т. 335. № 1.
3. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследования // М. 1998. МФ «Технонефтегаз». 260 с.
4. Толстихин 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 п-ова). Геохимия. 2014. № 12. С. 1099-1107.
5. 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.
6. 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.
7. 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. V. 444. P. 187-198.