ВЛИЯНИЕ ТВЕРДОФАЗНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ И СОДЕРЖАНИЕ ГЕЛИЯ В КЛИНОПИРОКСЕНЕ КОВДОРСКОГО МАССИВА

Сидоров М.Ю., Скиба В.И., Козлов Е.Н., Каменский И.Л.

¹ Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, sidorov@geoksc.apatity.ru

Введение, задачи и цели исследования

На протяжении ряда лет в лаборатории геохронологии и изотопной геохимии ГИ КНЦ РАН в качестве внутрिलाбораторного твердофазного стандарта применялся клинопироксен из Ковдорского массива, предоставленный Е.Г. Балаганской. Использование термического метода экстракции гелия в зернах и «пудре Икорского» выявило несколько позиций нахождения гелия в указанном клинопироксене (рис. 1). Сравнение этих данных показало, что одна из позиций содержит около 50% всего гелия вещества, в то время как содержание в них ³He от общего содержания этого изотопа достигает двух третей. Более радиогенный состав гелия из второй позиции, максимум выделения которого происходит при полной деструкции вещества (плавлении), позволяет интерпретировать его как радиогенный гелий, образовавшийся *in situ* за счет распада U и Th, в структуре минерала. Более мантийный гелий первой позиции рассматривается в качестве захваченного при кристаллизации. Традиционно в качестве основного механизма этого захвата рассматривается фиксация флюидной фазы в газовой-жидких микровключениях, однако каких-либо специализированных исследований на этот предмет не проводилось. Первоначальная цель нашей работы заключалась в поиске включений и комплексном исследовании их методами термобарогеохимии.

Рис. 1. Термограмма выделения гелия в зернах и «пудре».

Образцы, методы исследования и результаты

Монофракция клинопироксена из Ковдорского массива представлена буровато-зелеными кристаллами и их обломками, размер которых варьирует от 0,1 до 1,5 мм с преобладанием крупного размерного класса (рис. 2, а). Вместе с клинопироксеном в монофракции присутствует незначительное количество других минералов, среди которых чаще всего встречаются магнетит и флогопит.

Для поиска и диагностики флюидных включений был изготовлен искусственный аншлиф, содержащий около 160 кристаллов клинопироксена. Исследования проводились с помощью рамановского спектрометра Horiba Yvon HR 800, оборудованном конфокальным микроскопом Olympus BX41 (РЦ «Геомодель», Научный парк СПбГУ, аналитик В.Н. Бочаров) по рекомендациям, указан-

Рис. 2. Клинопироксен Ковдорского массива.

а – общий вид монофракции клинопироксена (оптическое изображение в проходящем свете); б – твердофазные минеральные включения в клинопироксене (изображение в обратно отраженных электронах). Phl – флогопит, Cal – кальцит, Mgt – магнетит, Per – перовскит.

ным в [3]. К нашему удивлению, собственно флюидные включения в исследованной выборке кристаллов отсутствуют! Вместо них были обнаружены многочисленные твердофазные минеральные включения, буквально переполняющие клинопироксен.

Для диагностики и определения химического состава минеральных включений в клинопироксене использовался электронный сканирующий микроскоп Hitachi S-3400 N, оборудованный энергодисперсионной приставкой для количественного анализа EDX-AzTec Energy 350 с комплектом стандартных образцов (РЦ «Геомодель», Научный парк СПбГУ, аналитик Н.С. Власенко). В ходе исследования в клинопироксене были диагностированы твердофазные минеральные включения магнетита, кальцита, апатита, флогопита, перовскита и их сростания (рис. 2, б). Объемное содержание минеральных включений в клинопироксене составляет 10-15%.

Специфика минерального состава включений, обладающих резко отличной магнитной восприимчивостью, позволила для грубого экспрессного разделения вещества использовать универсальный постоянный магнит А.Я. Сочнева модели С-5. Разделение проводилось на сильномагнитную и слабомагнитную фракции и немагнитный остаток (В.И. Басалаева, ГИ КНЦ РАН, Апатиты). В сильномагнитной фракции клинопироксен присутствует в незначительных количествах, в целом она отвечает составу темноцветных включений с преобладанием магнетита. Слабомагнитная фракция представлена клинопироксеном и флогопитом. Немагнитная фракция состоит из обломков клинопироксена с незначительной примесью других минералов и больше других фракций соответствует исходному клинопироксену (рис. 3).

Рис. 3. Выделенные по магнитным свойствам фракции.

а – магнитная, б – слабомагнитная, в – немагнитный остаток. Изображения в отраженном свете. Линейный масштаб 250 мкм.

Размер минеральных обломков в выделенных фракциях значительно меньше, чем модальный размер ранее исследованного исходного клинопироксена и варьирует от 0.01 до 0.25 мм, причем магнитная и немагнитная фракции сложены самыми мелкими обломками. В исходной фракции клинопироксена и отсепарированных фракциях для выделения гелия применялся метод дробления в вакуумированных стеклянных ампулах [1]. Анализы производились на масс-спектрометре МИ-1201. В дополнение к полученным результатам (таблица) приведены данные по гелию в исходном пироксене, экстрагированному как дроблением, так и плавлением. Отметим, что именно в исходной монофракции клинопироксена установлены самые высокие содержания и отношения изотопов гелия. Из трех фракций самое низкое отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ оказалось в магнитной фракции, значительно выше (в 1.5 раза) – в слабомагнитной, а самое высокое, близкое к исходному клинопироксену, – в немагнитной. Для всех выделенных фракций получено меньшее содержание изотопов гелия по сравнению с исходной монофракцией клинопироксена.

Таблица. Результаты изотопных анализов гелия в различных по магнитным свойствам фракциях из клинопироксена Ковдорского массива.

Образец	Навеска, г	Фракция, мм	Метод экстракции	$^4\text{He} \times 10^{-6}$, см ³ /г	$(^3\text{He}/^4\text{He})$		$^3\text{He} \times 10^{-10}$, см ³ /г
					$\times 10^{-6}$	R	
Магнитная фракция	0.1	0.01-0.25	дробление	5.7	8.8	6.29	0.50
Слабомагнитная фракция	0.1	0.01-0.25	дробление	7.7	12.2	8.71	0.94
Немагнитная фракция	0.2	0.01-0.25	дробление	5.95	13.7	9.79	0.82
Исходный клинопироксен	2.0	0.25-0.63	дробление	12.1	16.3	11.64	1.97
	2.0	0.25-0.63	дробление	12.3	15.9	11.36	1.96
	0.4	0.25-0.63	дробление	18.3	15.01	10.72	2.75
	2.0	0.25-0.63	плавление	37	8.31	0.23	3.08
	2.0	0.25-0.63	плавление	40	7.6	0.19	3.04

Примечание: $R = (^3\text{He}/^4\text{He}) / R_a$, где R_a – соотношение изотопов гелия в атмосферном воздухе, равное $1,4 \times 10^{-6}$.

Обсуждение результатов и выводы

Специальные исследования в значительной выборке кристаллов клинопироксена Ковдорского массива не выявили присутствие в них флюидных микровключений, что оставляет открытым вопрос о местонахождении захваченного гелия в этом минерале.

Значительная разница в содержаниях и отношениях изотопов гелия в исходном клинопироксене и выделенных фракциях (рис. 4) объясняется нами меньшими размерами минеральных обломков во фракциях. Напомним, что ранее исследовавшийся исходный клинопироксен в силу некоторых обстоятельств был существенно более крупнозернистым, чем тот, что пошел на магнитную сепарацию. Наблюдающаяся устойчивая тенденция к уменьшению содержания гелия в клинопироксене по мере снижения размерности зерен от исходного пироксена к отсепарированным фракциям, вероятней всего, связана с частичной физической потерей гелия из ранее указанной первой позиции («захваченного» гелия) в ходе измельчения вещества при пробоподготовке. Это объясняет и некоторое смещение отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ от исходного клинопироксена к пироксену из немагнитной и слабомагнитной фракции, что делает вопрос о структурной позиции гелия еще более острым.

С точки зрения отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ аномально низким (в 1.5-2 раза меньшими, чем в прочих анализах) оказался изотопный состав гелия в магнитной фракции, состоящей преимущественно из магнетита и флогопита – основных минералов включений. Отметим, что сходный результат был ранее получен при изучении изотопии гелия в магнетите и клинопироксене из мелилит-оливин-кальцитового пегматита Ковдорского массива [2]. Таким образом, сами включения в клинопироксене являются обособленным источником более радиогенного гелия.

Проведенные нами исследования показывают, что для корректной интерпретации данных по изотопии гелия необходимо проведение предварительного минералогического и химического изучения образцов. Прежде всего, это поиск и диагностика флюидных включений в прозрачных мине-

Рис. 4. Отношения изотопов гелия и концентрации ^4He в клинопироксене и различных по магнитным свойствам фракциях. R_a – соотношение изотопов гелия в атмосферном воздухе, $\Delta^4\text{He}$ – потери гелия при дроблении.

ралах с помощью рамановской спектроскопии как наиболее экспрессного метода. При выявлении заметного количества твердофазных включений в исследуемом минерале, необходимо попытаться разделить фазы различными методами сепарации (магнитная и электромагнитная сепарация, разделение в тяжелых жидкостях и др.) и провести изотопные исследования в выделенных фракциях. Для оценки вклада радиогенных изотопов гелия в выявленных отношениях $^3\text{He}/^4\text{He}$ необходимо провести химический анализ фракций на литий, уран и торий.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность В.И. Басалаевой (ГИ КНЦ РАН, Апатиты), а также В.Н. Бочарову и Н.С. Власенко (РЦ «Геомодель», Санкт-Петербург) за помощь в проведении аналитических работ.

Работа выполнена в Геологическом институте Кольского научного центра РАН в рамках государственного заказа № 0231-2015-0009.

Литература

1. Икорский С.В., Каменский И.Л. Метод дробления горных пород и минералов горных пород и минералов в стеклянных ампулах при изотопных исследованиях благородных газов // Тез. докл. XV Симпозиума по геохимии изотопов им. академика А.П. Виноградова. Москва. 1998. С. 115.
2. Каменский И.Л., Икорский С.В., Каулина Т.В. Диагностика изотопной генетической метки $^3\text{He}/^4\text{He}$ на примере минералов мелилит-оливин-кальцитового пегматита в оливинитах Ковдорского массива (Кольский полуостров) // Вестник ИГ КомиНЦ УрО РАН. 2014. № 12. С. 3-7.
3. Frezzotti M.L., Tesce F., Casagli A. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis // Journal of Geochemical Exploration. 2012. V. 112. P. 1-20.