

УДК 552.3:550.42:546.291/.292(470.21)

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ГЕЛИЯ И ОТНОШЕНИЕ $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ В ПИРИТЕ И МАГНЕТИТЕ ЭКСПЛОЗИВНОЙ КАРБОНАТИТОВОЙ БРЕКЧИИ МАССИВА САЛЛАНЛАТВА, КОЛЬСКИЙ РЕГИОН

© 2024 г. Е. Н. Козлов^{1,*}, Е. Н. Фомина¹, М. Ю. Сидоров¹,
А. В. Гудков¹, В. В. Колобов²

Представлено академиком РАН С.В. Кривовичевым 15.06.2024 г.

Поступило 15.06.2024 г.

После доработки 16.06.2024 г.

Принято к публикации 18.06.2024 г.

Изучены изотопный состав гелия и соотношения гелия и неона во флюидных включениях в магнетите и пирите из карбонатитовых брекчий щёлочно-ультраосновного комплекса Салланлатва, Кольская щелочная провинция (северо-запад России), с применением метода ступенчатого дробления. Полученные результаты указывают на высокую вероятность участия в формировании эксплозивных карбонатитовых брекчий Салланлатвы флюидов из нескольких источников, захваченных в различных пропорциях. Отношение R/Ra (R — измеренное отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$, а $Ra = 1.382 \times 10^{-6}$ — то же отношение в атмосферном воздухе) достигает величины 2.3, что является надёжным индикатором присутствия мантийных газов. Низкое (от 1 до 44) значение отношения $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ позволяет предполагать участие атмосферных газов, растворённых в палеометеорных водах. Сочетание этих двух фактов говорит в пользу гипотезы о фреатомагматической природе исследованных брекчий, т. е. об их формировании за счёт взаимодействия внедрявшегося горячего ортомагматического флюида с метеорными водами, несущими растворённые атмосферные газы.

Ключевые слова: карбонатиты, эксплозивные брекции, сульфиды, магнетит, изотопы гелия, Салланлатва, Кольская щелочная провинция

DOI: 10.31857/S2686739724100087

Благородные газы являются неотъемлемой составляющей флюидов, а их изотопные характеристики несут ценную петрологическую информацию [1]. В природе есть несколько глобальных резервуаров, в которых изотопные характеристики и элементная распространённость благородных газов значительно различаются (порой — на порядки): (1) мантия, (2) кора, (3) атмосфера (в том числе газы, растворённые в метеорных водах) [2]. Благодаря этому изучение благородных газов может указать на источники флюидов, вовлечённых в формирование геологических

объектов [1]. Карбонатитовые системы в целом и карбонатиты Кольской щелочной провинции в частности являются примером взаимодействия вещества трёх этих источников [3].

Кольская щелочная провинция (КЩП), сформировавшаяся 360–380 млн лет назад в девоне [4], включает в себя множество комплексов [5], многие из которых содержат карбонатиты. Породы (в т.ч. карбонатиты) комплексов КЩП стали объектом для детального изучения изотопных характеристик захваченных ими благородных газов, что позволило выявить на региональном уровне признаки плюм-литосферного взаимодействия, породившего первичные расплавы для комплексов КЩП, вклад различных источников в эти первичные расплавы и их дальнейшую эволюцию [3, 6]. Не меньший интерес представляют и результаты изучения

¹Геологический институт Кольского научного центра Российской Академии наук, Апатиты, Россия

²Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской Академии наук, Апатиты, Россия

*E-mail: kozlov_e.n@mail.ru

благородных газов на уровне отдельных комплексов КЩП, позволяющие глубже понять механизмы их формирования. Так, на примере массива Себляяр в работах [7, 8] продемонстрировано смешение флюидов с изотопными метками мантийного и атмосферного резервуаров. При изучении карбонатитов массива Вуориярви [9] также был установлен вклад в их формирование и коровых (метеорных) вод, и модифицированных мантийных флюидов. В рамках настоящей работы в фокусе исследования оказались карбонатиты, слагающие взрывную брекчию ещё в одном комплексе КЩП — массиве Салланлатва. Геология массива Салланлатва описана в работах [10, 11], а описание взрывных брекчий Салланлатвы представлены в работе [12].

Изучение таких относительно редко встречающихся брекчий представляет интерес для понимания того, какие геохимические преобразования осуществляются при переходе от интрузивного внедрения карбонатитовых расплавов к эффузивному, что сопровождается дегазацией и сопутствующим ей фракционированием элементов [13]. В дополнение к этому взрывные брекчии Салланлатвы заинтересовали геологов находками муассанита и алмаза [12]. Была изучена одна из разновидностей брекчий с цементом, сложенным тонкозернистым анкеритом (доминирующий минерал), хлоритом, баритом, стронцианитом, анкилитом-(Ce) $\text{CeSr}(\text{CO}_3)_2(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$ и гидроксилпатитом. В массе цемента наблюдаются угловатые фрагменты сидеритовых карбонатитов, единичные лейсты флогопита, а также крупные (до 10 мм в поперечнике) идиоморфные кристаллы магнетита и пирита и их обломки. Как известно [14], и магнетит, и пирит надёжно удерживают захваченные флюиды. Цель настоящего исследования состояла в изучении этих флюидов в попытке определить природу изученных брекчий. Необходимо отметить, что обогащённые Fe, Mg и в меньшей мере Mn ортомагматические флюиды с высоким содержанием H_2O и CO_2 играли ведущую роль в становлении комплекса Салланлатвы и в формировании его руд [11].

Для изотопного анализа гелий был извлечён из мономинеральных фракций магнетита и пирита (размерность кристаллов от 0.25 до 1.0 мм) трёх образцов керна карбонатитовой брекчии массива Салланлатва, отобранных при бурении разведочной скважины № 50 с разных глубин (186.0, 187.6 и 229.5 м). Содержание и

изотопный состав He и Ne определены на газовом масс-спектрометре МИ–1201(ИГ) в Геологическом институте КНЦ РАН (г. Апатиты). Экстракция благородных газов проводилась в высоковакуумных условиях путём ступенчатого дробления с применением электромеханической дробилки [15], позволяющей измельчать образцы в ручном и автоматическом режиме непосредственно в системе напуска масс-спектрометра. Метод ступенчатого дробления позволяет из захваченных минералами флюидных включений выделять газы поэтапно (от крупных включений к мелким, от более плотных к менее плотным и, соответственно, от менее к более прочно удерживаемым образцам), отделяя их от газовых компонентов, связанных в кристаллической решетке минерала [8]. В состав последних входят радиогенные изотопы благородных газов, образованные *in situ* за счёт процессов радиоактивного распада U, Th и других элементов. Примесь таких радиогенных газов искажает первичные изотопные характеристики захваченных флюидов [8]. Содержания U и Th в пудре, оставшейся после дробления, определялись методом ИСП-МС (ЦКП ИППЭС КНЦ РАН, г. Апатиты). Для минимизации вклада радиогенных газов нами измерялся изотопный состав только первой порции газа, выделившейся после 1000 ударов. Эта порция газа изучалась дробно: первое измерение проводилось после 100 ударов, второе — также после 100 ударов, а третье — после 800 ударов. Газ, выделившийся в каждой серии ударов, поступал в цельнометаллическую линию и очищался от активных газов (в первую очередь водорода) с помощью Ti–Zr-геттеров. Аргон и более тяжёлые газы осаждались на криогенной ловушке (активированный уголь, охлаждённый жидким азотом при 77°K). Калибровка чувствительности прибора и масс-дискриминации контролировалась регулярным измерением эталона с воздушным изотопным составом гелия и неона по схеме стандарт–образец–стандарт. Значения бланка для ^4He не превышали $1 \times 10^{-9} \text{ см}^3/\text{г}$, для ^{20}Ne — $2 \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{г}$. Ошибка измерения концентрации благородных газов (метод высоты пика) и отношения $^3\text{He}/^4\text{He}$ не превышала 10%, отношения $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ — 15% (1σ). Результаты анализа приведены в табл. 1. Содержания изотопов ^{21}Ne , ^{22}Ne , ^{36}Ar , ^{38}Ar и ^{40}Ar не определялись по техническим причинам. В настоящий момент приборы МИ–1201(ИГ) в ГИ КНЦ РАН проходят глубокую техническую модернизацию. Настоящая работа содержит первые результаты,

Таблица 1. Концентрация изотопов ⁴He, ³He и ²⁰Ne (см³/г), а также отношения ³He/⁴He и ⁴He/²⁰Ne во флюидах, извлечённых ступенчатым дроблением из магнетита и пирита из карбонатитовых взрывчатых брикетов щелочно-ультраосновного массива Салланлата

Кумуля- тивное кол-во ударов	⁴ He × 10 ⁻⁶ , см ³ /г STP*	³ He × 10 ⁻¹² , см ³ /г STP*	²⁰ Ne × 10 ⁻⁷ , см ³ /г STP*	⁴ He/ ³ He × 10 ⁶	±	<i>R/Ra</i>	⁴ He/ ²⁰ Ne	±
SAL_50/186.0-Mag#1 [масса пробы 0.12 г, U – 6.1 ppm, Th – 286 ppm]**								
100	13.0 (25.0%)	15.6 (45.4%)	4.84 (41.0%)	0.833	0.7	0.049	26.9	2.3
200	13.7 (26.3%)	10.3 (30.0%)	3.68 (31.2%)	1.33	0.08	0.544	37.2	3.6
1000	25.4 (48.8%)	8.43 (24.6%)	3.29 (27.9%)	3.01	0.24	0.240	77.2	8.0
Итого:	52.1	34.3	11.8	1.52	0.17	0.477	44.2	3.9
SAL_50/186.0-Mag#2 [масса пробы 0.12 г, U – 8.5 ppm, Th – 698 ppm]								
100	8.61 (28.6%)	27.9 (72.5%)	149 (45.6%)	0.309	0.022	2.34	0.578	0.045
200	3.88 (12.9%)	2.94 (7.6%)	60.7 (18.6%)	1.32	0.12	0.548	0.639	0.051
1000	17.6 (58.5%)	7.63 (19.8%)	117 (35.9%)	2.30	0.17	0.314	1.50	0.12
Итого:	30.1	38.5	326	0.781	0.080	0.926	0.923	0.071
SAL_50/187.6-Py [масса пробы 0.09 г, U – 0.82 ppm, Th – 15.7 ppm]								
100	5.34 (25.7%)	19.2 (61.5%)	60.6 (92.1%)	0.278	0.016	2.60	0.881	0.060
200	2.36 (11.3%)	4.75 (15.2%)	1.74 (2.6%)	0.498	0.035	1.46	13.6	1.0
1000	13.1 (63.0%)	7.23 (23.2%)	3.44 (5.2%)	1.81	0.14	0.399	38.1	2.6
Итого:	20.8	31.2	65.8	0.667	0.071	1.09	3.16	0.24
SAL_50/187.6-Mag [масса пробы 0.14 г, U – 0.63 ppm, Th – 9.10 ppm]								
100	4.82 (37.1%)	28.4 (69.1%)	30.9 (91.4%)	0.170	0.007	4.26	1.56	0.19
200	1.47 (11.3%)	4.98 (12.1%)	0.786 (2.3%)	0.295	0.019	2.45	18.7	2.0
1000	6.70 (51.6%)	7.74 (18.8%)	2.11 (6.2%)	0.862	0.089	0.836	31.8	4.6
Итого:	13.0	41.1	33.8	0.316	0.039	2.29	3.85	0.36
SAL_50/229.5-Py [масса пробы 0.29 г, U – 10.9 ppm, Th – 36.3 ppm]								
100	22.9 (56.5%)	15.3 (69.9%)	0.592 (5.5%)	1.50	0.09	0.483	387	27
200	4.43 (10.9%)	2.53 (11.6%)	0.362 (3.4%)	1.75	0.12	0.413	122	9
1000	13.2 (32.6%)	4.05 (18.5%)	9.75 (91.1%)	3.26	0.23	0.222	13.5	1.0
Итого:	40.5	21.9	10.7	1.85	0.18	0.391	37.9	2.6
SAL_50/229.5-Mag [масса пробы 0.12 г, U – 10.8 ppm, Th – 112 ppm]								
100	4.30 (33.8%)	8.78 (48.6%)	55.2 (83.2%)	0.490	0.034	1.48	0.779	0.08
200	1.66 (13.0%)	2.66 (14.7%)	5.77 (8.7%)	0.625	0.059	1.16	2.88	0.41
1000	6.77 (53.2%)	6.61 (36.6%)	5.39 (8.1%)	1.02	0.02	0.706	12.6	1.9
Итого:	12.7	18.1	66.4	0.699	0.073	1.03	1.91	0.22

Примечание. Погрешности измерения концентраций составляют ±10%. Ошибки определения изотопных соотношений находятся на уровне достоверности 1σ. * В круглых скобках приведена доля от суммарного объёма изотопа, выделившегося после 1000 ударов. ** В квадратных скобках приведены масса пробы и содержания U и Th, измеренные в пудре, оставшейся после дробления.

полученные на обновлённых масс-спектрометрах, однако для перечисленных изотопов методики анализа, учитывающие новые технические характеристики приборов, находятся на стадии тестирования.

Из исследованных образцов по итогам 1000 ударов суммарно выделилось $n \times 10^{-11}$ см³/г ³He и $m \times 10^{-5}$ см³/г ⁴He, где наименьшие и наибольшие значения n различались в 2 раза, а m — в 4 раза (табл. 1). На фоне этого наибольшее измеренное значение содержания ²⁰Ne отличается от наименьшего более чем в 30 раз. По этой причине установлен относительно узкий диапазон вариаций значений ³He/⁴He (R/Ra от 0.4 до 2.3 Ra), в то время как отношение ⁴He/²⁰Ne изменялось от 1 до 44. При этом какой-либо связи между измеренными концентрациями благородных газов, их изотопными отношениями и тем, какой минерал-хозяин исследовался (пирит или магнетит), не обнаружено. Так, результаты изучения двух образцов магнетита с глубины 186.0 м различаются между собой не меньше, чем результаты изучения пар пирит–магнетит с глубин 187.6 м и 229.5 м (табл. 1). Отметим, что к настоящему моменту для карбонатитов лишь трёх комплексов КЩП (Ковдора, Себлявры и Вуориярви) у единичных образцов были определены значения ³He/⁴He выше такового в воздухе (т. е. > 1 Ra) [3, 7, 9], в то время как для карбонатитов Хибин, Озёрной Вараки и Салмагоры эти значения << 1 Ra [3]. Данное сравнение носит оценочный характер. Минералы всех перечисленных комплексов, за исключением Себлявры [7], исследовались с применением метода дробления в одну ступень. Для более корректного сопоставления требуется ревизия уже имеющихся данных путём повторного изучения в коллекциях каменного материала из комплексов КЩП газов, извлечённых ступенчатым дроблением, желательно выполненным по единой методике.

Исследование содержания U и Th в пудре (см. табл. 1) показало присутствие заметного количества тория (до 700 ppm) при меньшем содержании урана (от 0.6 до 11 ppm). Одновременно установлены повышенные содержания целого ряда элементов, не типичных ни для пирита, ни для магнетита (например, Nb, Ba, Sr, REEs). Это позволяет предполагать, что и U, и Th содержатся в минеральных включениях, предположительно в пирохлоре. Столь высокие содержания тория способны вырабатывать *in situ* существенный объём ⁴He, тем самым понижая значение R/Ra и ретушируя мантийные

метки. Действительно, наблюдается отчетливая тенденция “чем выше значение U+0.24Th, тем ниже отношение R/Ra ” (рис. 1 а). При этом, как сказано выше, содержание ³He оказалось очень выдержанным. Это позволяет предполагать, что за вариации R/Ra ответственен именно ⁴He, образовавшийся *in situ*. Мы рассмотрели большую выборку данных по изотопному составу гелия в карбонатитах и комплементарных им щелочных породах комплексов КЩП из работы [3]. Анализ этих данных (рис. 1 б) показал, что все изученные образцы, содержащие < 10⁻¹¹ см³/г ³He, характеризуются значением R/Ra ниже воздушного. Среди проб с ³He < 10⁻¹⁰ см³/г большинство имеют $R/Ra = n \times 10^{-1}$. И лишь для проб, содержащих > 10⁻¹⁰ см³/г ³He, в большинстве случаев можно уверенно говорить о присутствии мантийного компонента. По всей видимости, при содержании ³He ниже, чем 10⁻¹⁰ см³/г, наблюдается влияние *in situ* радиогенного гелия. Результаты нашего исследования подтверждают это правило. Однако ступенчатое дробление может несколько смягчить этот эффект, позволяя выявить присутствие мантийных газов. В нашем случае лишь у одной пробы изотопный состав валового гелия оказался заметно больше 1 Ra . В то же время порции газа, проанализированные после первых 100 ударов, имели значение R/Ra существенно выше воздушного (от 1.5 до 4.3 Ra) в четырёх пробах из шести.

Во всех экспериментах в первых порциях газа выделялась существенная доля (от 25% до 56%) от суммарного объёма ⁴He, выделившегося после 1000 ударов. Соответствующая доля ³He была ещё выше (от 45% до 72%). Именно по этой причине первые порции извлечённых флюидов характеризовались наиболее высоким значением отношения ³He/⁴He, которое по мере дробления снижалось в 2–7 раз. При этом фигуративные точки анализов расположились вблизи линии смешения между веществом Кольского плюма с отношением ⁴He/³He ~30000 [3] (~24 Ra) и радиогенным гелием, образованным в минерале *in situ* и выделившимся из кристаллической решетки при дроблении (рис. 1 в). Данная линия, выявленная при изучении пород Себлявры, и её природа подробно описаны в работе [8].

В большинстве случаев наибольшая доля (до 92%) изотопа ²⁰Ne также выделялась на первой ступени дробления и при дальнейшем измельчении образца резко падала. При этом наблюдается согласованное снижение значений отношений R/Ra и ⁴He/²⁰Ne (рис. 1 г). Привлекают внимание низкие значения ⁴He/²⁰Ne

(в индивидуальных ступенях дробления до 0.6), установленные для некоторых образцов (табл. 1). Известно, что гелий быстрее диффундирует из пород и минералов, чем неон [14]. Поэтому диффузионная потеря гелия из образцов может с течением времени приводить к понижению отношения $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ [14]. Однако, как было

отмечено ранее, вариации отношения $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ обусловлены не различиями в содержании гелия, а разным количеством неона. Это плохо согласуется с моделью избирательной потери гелия. Более реалистичным представляется вовлечение атмосферных газов, которые характеризуются исключительно низким значением $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$,

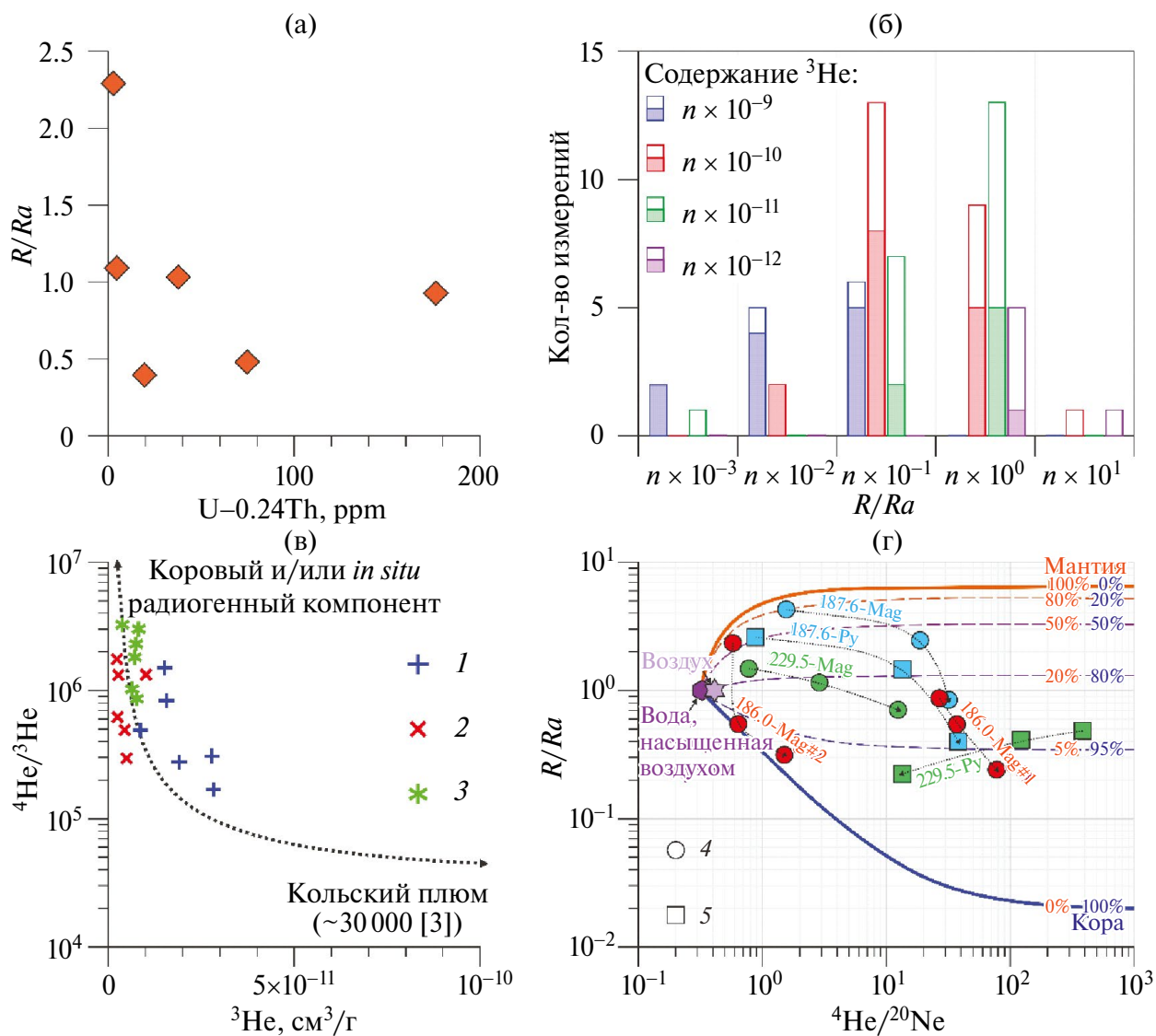


Рис. 1. (а) Сопоставление отношения R/Ra в валовом газе, извлечённом при дроблении, с содержанием $U+0.24Th$ (ppm), определённым в пудре, оставшейся после дробления. (б) Гистограмма, отражающая связь частоты встречаемости определённых значений отношения R/Ra в зависимости от содержания ^3He для минералов и валовых проб карбонатов (закрашенные области столбиков) и комплементарных им пород (пустые области) из комплексов КЩП по данным из работы [3]. Сопоставление (в) концентрации ^3He с изотопным отношением $^4\text{He}/^3\text{He}$ и (г) отношений R/Ra и $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ во флюидах, извлечённых ступенчатым дроблением из пирита и магнетита взрывчатых карбонатитовых брекчий массива Салланлатва. Основные обозначения: 1 — первая ступень дробления (до 100 ударов), 2 — вторая ступень (от 100 до 200 ударов), 3 — третья ступень дробления (от 200 до 1000 ударов), 4 — магнетит (Mag), 5 — пирит (Py). На рисунке (в) приведена линия смешения, построенная по данным из работы [8], между веществом Кольского плюма [3] и радиогенным гелием, образованным в минерале in situ. На рисунке (г) цвет символов соответствует исследованному образцу (красный — 186.0 м, голубой — 187.6 м, зелёный — 229.5 м), а стрелки отражают последовательность ступеней дробления от первой к третьей. На рисунке (г) также приведены линии смешения между водой, насыщенную воздухом, корой и верхней мантией ([1, 16] и ссылки там), а также изотопные характеристики воздуха атмосферы [17]

отличающим атмосферу от прочих резервуаров (0.318 против >1000 в мантийных и коровых газах (см. [1, 16, 17] и ссылки там). Перенос атмосферных газов в глубинные слои осуществляется метеорными водами, причём растворённые в них газы характеризуются даже более низкими значениями $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ -отношения. Положение фигуративных точек проанализированных образцов на диаграмме отношений R/R_a и $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ (рис. 1г) позволяет предполагать, что захваченный неон имеет именно атмосферное происхождение.

В совокупности полученные результаты говорят в пользу гипотезы о фреатомагматической природе исследованных брекчий, т. е. об их формировании за счёт взаимодействия внедрявшегося горячего расплава/флюида с метеорными водами [13], несущими растворённые атмосферные газы. Исходя из имеющихся данных, в формировании карбонатитов комплекса Салланлатва активное участие принимал углекислотно-водный ортомагматический флюид, однородный при $T > 250^\circ\text{C}$, но гетерогенный при более низких температурах [11]. При этом предполагается, что трансформация флюида из однородного в гетерогенный может сопровождаться взрывными событиями. Таким образом, взаимодействие метеорных вод с ортомагматическим флюидом, вызвавшее резкое остывание последнего, могло стать триггером, вызвавшим взрывное событие.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензентам, чьи конструктивные критические замечания позволили улучшить текст. Глубокая признательность выражается Александру Борисовичу Верховскому за обсуждение рукописи.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счёт средств Российского научного фонда, проект № 19-77-10039-П. Методическая и инструментальная база исследований изотопов благородных газов разработаны и поддерживаются в рамках государственных заданий ГИ КНЦ РАН (Апатиты) FMEZ-2024-0004 и ЦЭС КНЦ РАН (Апатиты) FMEZ-2022-0014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ballentine C. J., Burgess R., Marty B. Tracing Fluid Origin, Transport and Interaction in

the Crust // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2002. V. 47. №1. P. 539–614.
<https://doi.org/10.2138/rmg.2002.47.13>

2. Mamyrin B. A., Tolstikhin I. N. Helium isotopes in nature. Amsterdam, New York: Elsevier, 1984. 288 p.
3. Tolstikhin I. N., Kamensky I. L., Marty B., Nivin V. A., Vetrin V. R., Balaganskaya E. G., Ikorsky S. V., Gannibal M. A., Weiss D., Verhulst A., Demaiffe D. Rare gas isotopes and parent trace elements in ultrabasic-alkaline-carbonatite complexes, Kola Peninsula: identification of lower mantle plume component // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2002. V. 66. № 5. P. 881–901.
[https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(01\)00807-9](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(01)00807-9)
4. Kramm U., Kogarko L. N., Kononova V. A., Vartiainen H. The Kola Alkaline Province of the CIS and Finland: Precise Rb–Sr ages define 380–360 Ma age range for all magmatism // *Lithos*. 1993. V. 30. № 1. P. 33–44.
[https://doi.org/10.1016/0024-4937\(93\)90004-v](https://doi.org/10.1016/0024-4937(93)90004-v)
5. Downes H., Balaganskaya E., Beard A., Liferovich R., Demaiffe D. Petrogenetic processes in the ultramafic, alkaline and carbonatitic magmatism in the Kola Alkaline Province: A review // *Lithos*. 2005. V. 85. № 1–4. P. 48–75.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.03.020>
6. Marty B., Tolstikhin I., Kamensky I. L., Nivin V. A., Balaganskaya E., Zimmermann J.-L. Plume-derived rare gases in 380 Ma carbonatites from the Kola region (Russia) and the argon isotopic composition in the deep mantle // *Earth and Planetary Science Letters*. 1998. V. 164. № 1–2. P. 179–192.
[https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(98\)00202-7](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(98)00202-7)
7. Буйкин А. И., Верховский А. Б., Сорохтина Н. В., Когарко Л. Н. Состав и источники летучих и благородных газов во флюидных включениях в пироксенитах и карбонатитах Себлявского массива, Кольский полуостров // *Петрология*. 2014. Т. 22. № 5. С. 546–560.
<https://doi.org/10.7868/s0869590314050033>
8. Буйкин А. И., Камалеева А. И., Сорохтина Н. В. К вопросу об эффективности разделения захваченных и образованных in situ компонентов благородных газов при дроблении образцов в вакууме // *Геохимия*. 2018. № 6. С. 586–593.
<https://doi.org/10.7868/s0016752518060079>
9. Kozlov E., Skiba V., Fomina E., Sidorov M. Noble gas isotopic signatures of sulfides in carbonatites of the Vuoriyarvi alkaline-ultrabasic complex (Kola Region, NW Russia) // *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. V. 14. Art. № 1725.
<https://doi.org/10.1007/s12517-021-07884-9>
10. Кухаренко А. А., Булах А. Г., Багдасаров Э. А., Римская-Корсакова О. М., Нефедов Е. И., Ильинский Г. А., Сергеев А. С., Абакумова Н. Б. Каледон-

- ский комплекс ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов Кольского полуострова и Северной Карелии. М.: Недра, 1965. 772 с.
11. Zaitsev A. N., Sitnikova M. A., Subbotin V. V., Fernández-Suárez J., Jeffries T. E. Sallanlatvi Complex – a rare example of magnesite and siderite carbonatites // Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key example of the Kola alkaline province. Eds. F. Wall, A.N. Zaitsev. London: Mineralogical Society of Great Britain & Ireland, 2004. P. 201–245. <https://doi.org/10.1180/MSS.10.07>
 12. Афанасьев Б.В. Минеральные ресурсы щелочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова. СПб.: Изд-во “Роза ветров”, 2011. 224 с.
 13. Walter B. F., Giebel R. J., Siegfried P. R., Gudelius D., Kolb J. The eruption interface between carbonatitic dykes and diatremes – The Gross Brückaros volcanic field Namibia // Chemical Geology. 2023. V. 621. Art. № 121344. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2023.121344>
 14. Wilske C., Suckow A., Gerber C., Deslandes A., Crane P., Mallants D. Mineral Crushing Methods for Noble Gas Analyses of Fluid Inclusions // Geofluids. 2023. V. 2023. Art. ID 8040253. P. 1–25. <https://doi.org/10.1155/2023/8040253>
 15. Скиба В. И., Каменский И. Л., Ганнибал М. А., Пахомовский Я. А. Распределение изотопов гелия и аргона в амфиболе из кварц-полевошпатовой жилы контактовой зоны Понойского массива (Кольский полуостров) // Записки РМО. 2018. Т. 147. № 4. С. 96–107.
 16. Defourny A., Blard P.-H., Zimmermann L., Jobé P., Collignon A., Nguyen F., Dassargues A. $\delta^{13}\text{C}$, $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$ and ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ ratios reveal the presence of mantle gas in the CO_2 -rich groundwaters of the Ardennes massif (Spa, Belgium) // Hydrology and Earth System Sciences. 2022. V. 26. № 10. P. 2637–2648.
 17. Ozima M., Podosek F. A. Noble Gas Geochemistry (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 286 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511545986>

HELIUM ISOTOPE COMPOSITION AND ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$ RATIO IN PYRITE AND MAGNETITE OF EXPLOSIVE CARBONATITE BRECCIAS OF THE SALLANLATVA MASSIF, KOLA REGION

E. N. Kozlov^{a, #}, E. N. Fomina^a, M. Yu. Sidorov^a,
A. V. Gudkov^a, V. V. Kolobov^b

Presented by Academician of the RAS S.V. Krivovichev June 15, 2024

^a*Geological Institute of Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation*

^b*Northern Energetics Research Centre of Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation*

[#]*E-mail: kozlov_e.n@mail.ru*

We studied the isotopic composition and helium and neon ratios of fluid inclusions in magnetite and pyrite from carbonatite breccias of the Sallanlatva alkaline-ultrabasic complex using the step-crushing method. The results indicate a high probability that fluids from several sources, captured in different proportions, were involved in the formation of the Sallanlatva explosive carbonatite breccias. The R/R_a ratio (R is the measured ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ ratio, and $R_a = 1.382 \times 10^{-6}$ is the same ratio in atmospheric air) reaches a value of 2.3, which is a reliable indicator of mantle gas involvement. The low (1 to 44) value of the ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$ ratio suggests the contribution of atmospheric gases dissolved in paleometeoric waters. The combination of these two facts supports the hypothesis of the phreatomagmatic nature of the studied breccias, i.e. their formation due to the interaction of infiltrated high-temperature orthomagmatic fluid with meteoric waters transporting dissolved atmospheric gases.

Keywords: carbonatites, explosive breccias, sulfides, magnetite, helium isotopes, Sallanlatva, Kola alkaline province