

УДК 552.3:550.42:551.464.629.1(517.3)

## ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ГЕЛИЯ В ЩЕЛОЧНЫХ ИНТРУЗИЯХ ПРИХУБСУГУЛЬЯ, СЕВЕРО-ЗАПАДНАЯ МОНГОЛИЯ

© 2023 г. В. В. Врублевский<sup>1,\*</sup>, А. А. Петлина<sup>1</sup>, А. В. Гудков<sup>2</sup>, М. Ю. Сидоров<sup>2</sup>, А. С. Семиряков<sup>1</sup>,  
Р. А. Шелепаев<sup>3,4</sup>, А. В. Вишневский<sup>3,4</sup>, И. Ф. Гертнер<sup>1</sup>, Е. Н. Фомина<sup>2</sup>,  
Е. Н. Козлов<sup>2</sup>, О. В. Удоратина<sup>5</sup>

Представлено академиком РАН В.В. Ревердатто 14.02.2023 г.

Поступило 14.02.2023 г.

После доработки 13.06.2023 г.

Принято к публикации 20.06.2023 г.

Изучен изотопный состав гелия флюидных включений в магнетите щелочных и субщелочных интрузий Прихубсугулья в Северо-Западной Монголии. Измеренное содержание  $^4\text{He}$  варьирует в диапазоне от  $6.6 \times 10^{-7}$  до  $114 \times 10^{-7}$  см<sup>3</sup>/г. Изотопное отношение  $^3\text{He}/^4\text{He}$  большинства образцов варьирует в интервале 0.23–0.59 *Ra* и может свидетельствовать о присутствии в магматогенном флюиде гелия из разных источников. Максимум мантийного  $\text{He}$  (2.51 *Ra*) наблюдается в магнетите субщелочного габбро. При генерации первичной магмы с вероятным участием вещества SCLM-типа или менее обогащенного  $^3\text{He}$  плюмоподобного резервуара мантийная компонента гелия составляла около 40–60%. В эволюции фойдовых и щелочно-сиенитовых расплавов ее доля не превышала ~10–15% из-за смешивания с радиогенным  $\text{He}$  корового происхождения. Предполагается взаимодействие интрузий с фрагментами докембрийских аккреционно-коллизийных комплексов Тувино-Монгольского террейна. Подобное смешение изотопов  $\text{He}$  в расплавах и флюидах может служить косвенным признаком развития мантийного магматизма на активной континентальной окраине.

**Ключевые слова:** щелочной и субщелочной магматизм, изотопы гелия, мантийно-коровое взаимодействие, Прихубсугульский прогиб, Северо-Западная Монголия

DOI: 10.31857/S2686739723600315, EDN: MTDLPQ

Как правило, ареалы континентального щелочного магматизма расположены в зонах активности сублитосферных мантийных плюмов [1]. В условиях рифтинга платформенных блоков про-

изводные первичных магм обычно сохраняют изотопно-геохимические отметки глубинной природы их вещества [2]. Однако в более подвижных орогенических структурах формирование щелочных интрузий нередко сопровождается мантийно-коровым взаимодействием, признаки которого неоднократно фиксируются в плутонических ассоциациях щелочных пород и карбонатов западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) ([3–6] и ссылки там). В некоторых случаях предполагается отсутствие плюмового компонента в составе первичной щелочной магмы [7].

Изотопный состав гелия из флюидных включений в минералах изверженных пород является одним из самых значимых индикаторов участия глубинной мантии в процессах магмогенерации. Предположительно, ее вещество, обогащенное

<sup>1</sup>Национальный исследовательский  
Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Геологический институт Кольского научного центра  
Российской академии наук, Апатиты, Россия

<sup>3</sup>Институт геологии и минералогии  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
Новосибирск, Россия

<sup>4</sup>Национальный исследовательский Новосибирский  
государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>5</sup>Институт геологии Коми научного центра  
Уральского отделения Российской академии наук,  
Сыктывкар, Россия

\*E-mail: vasvr@yandex.ru

**Таблица 1.** Результаты изотопного анализа гелия и ICP–MS (U, Th) в акцессорном магнетите магматических пород Юго-Западного Прихубсугуля

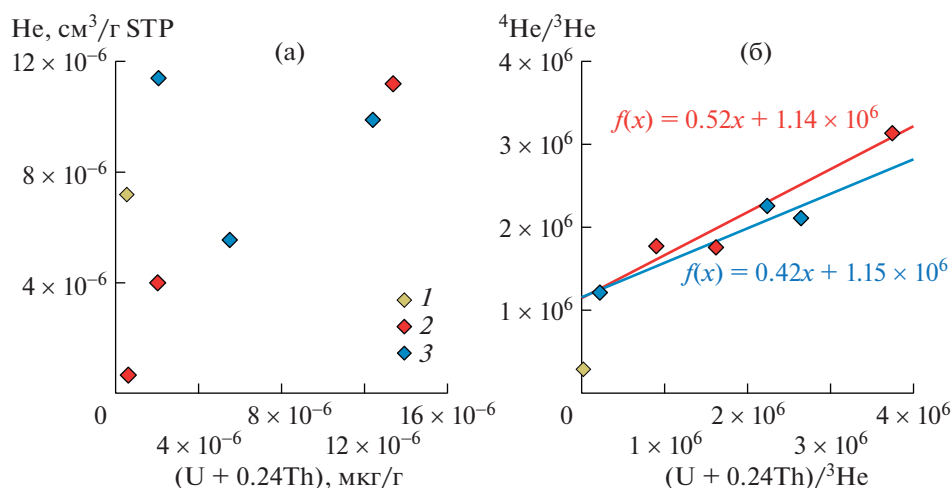
| Плутон         | Порода                           | $^4\text{He}$ ( $\times 10^{-7}$ ),<br>см <sup>3</sup> /г STP | $^3\text{He}/^4\text{He}$ ,<br>$\times 10^{-8}$ (R) | R/Ra | U, мкг/г        | Th, мкг/г      |
|----------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------|-----------------|----------------|
| Додтам-Гол     | Субщелочное габбро <sup>1*</sup> | $71.9 \pm 3.4$                                                | $348 \pm 18$                                        | 2.51 | $0.20 \pm 0.02$ | $1.4 \pm 0.2$  |
| Бэлтэсин-Гол   | Якупирангит <sup>2*</sup>        | $40.0 \pm 1.9$                                                | $56.4 \pm 3.8$                                      | 0.41 | $1.5 \pm 0.4$   | $2.2 \pm 0.3$  |
| "              | Ийолит-уртит <sup>2*</sup>       | $112 \pm 5$                                                   | $31.9 \pm 3.5$                                      | 0.23 | $10 \pm 2$      | $14.1 \pm 0.4$ |
| Овермараат-Гол | Монцонит <sup>2*</sup>           | $6.60 \pm 0.35$                                               | $56.9 \pm 5.0$                                      | 0.41 | $0.32 \pm 0.04$ | $1.2 \pm 0.2$  |
| Бурэнхан-Обо   | Щелочной сиенит <sup>3*</sup>    | $55.5 \pm 3.4$                                                | $44.3 \pm 5.0$                                      | 0.32 | $2.5 \pm 0.5$   | $12.5 \pm 0.4$ |
| Барунман-Хан   | Нефелиновый сиенит <sup>3*</sup> | $114 \pm 6$                                                   | $82.5 \pm 4.1$                                      | 0.59 | $1.3 \pm 0.3$   | $3.2 \pm 0.5$  |
| "              | Щелочной сиенит <sup>3*</sup>    | $98.9 \pm 5.1$                                                | $47.4 \pm 7.4$                                      | 0.34 | $7.0 \pm 1.0$   | $22.5 \pm 0.6$ |

\*Магматические формации (ассоциации): <sup>1\*</sup> – габбро-сиенитовая, <sup>2\*</sup> – щелочно-габброидная, <sup>3\*</sup> – щелочно-сиенитовая. Концентрации U и Th измерены методом ICP–MS на оборудовании ЦКП “Геоаналитик” (грант Минобрнауки РФ 075-15-2021-680) в Институте геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург.

изотопом  $^3\text{He}$ , транспортируется глубинными плюмами и преобладает в базальтах океанских островов (ОИВ). Подобные породы характеризуются максимально высокими значениями изотопного отношения  $^3\text{He}/^4\text{He}$  (до  $\sim 50$  Ra, где Ra – отношение  $^3\text{He}/^4\text{He} = 1.39 \times 10^{-6}$  в атмосферном воздухе ([8] и ссылки там). Для верхнемантийных производных отношения  $^3\text{He}/^4\text{He}$  существенно меньше ( $\sim 7$ – $9$  Ra для MORB и  $\sim 5$ – $7$  Ra для континентальной литосферной мантии SCLM) [9]. В изотопном составе гелия коровых образований отмечается резкое обогащение радиогенным  $^4\text{He}$  ( $0.01$ – $0.05$  Ra) [10]. Такая контрастность вещества главных земных резервуаров позволяет рассматривать изотопный состав гелия в качестве надежного индикатора разноглубинных источников первичных магм.

Нами проведено исследование пяти небольших (до  $\sim 30$  км<sup>2</sup>) штокообразных интрузивов, сосредоточенных в юго-западной части Прихубсугульского прогиба СЗ-Монголии и прорывающих метаосадочные породы и гранитоиды Тувино-Монгольского докембрийского террейна ЦАСП. Изученные плутоны относятся к различным по составу и возрасту магматическим формациям (ассоциациям): щелочно-габброидной (массивы Бэлтэсин-Гол, Овермараат-Гол,  $\sim 430$  млн лет), габбро-сиенитовой (массив Додтам-Гол,  $\sim 300$ – $275$  млн лет) и щелочно-сиенитовой (массивы Барунман-Хан, Бурэнхан-Обо,  $\sim 290$ – $280$  млн лет) [11, 12].

Для изотопного анализа гелий был извлечен из магнетита, образующего в изученных породах акцессорную вкрапленность изометричных (до  $0.2$ – $0.3$  мм в поперечнике) зерен. Мономинеральные фракции отбирались под бинокулярной лупой. По данным сканирующей электронной микроскопии (комплекс TESCAN VEGA II LMU, НИ ТГУ, г. Томск) магнетит не содержит включений других минералов, кроме ильменита, возникшего при распаде твердого раствора. Содержание и изотопный состав He определены на статическом масс-спектрометре МИ–1201 (ИГ) в Геологическом институте КНЦ РАН (г. Апатиты). Экстракция гелия проводилась в высоковакуумных условиях путем ступенчатого дробления с применением электромеханической дробилки [13], позволяющей измельчать образцы в ручном и автоматическом режиме непосредственно в системе напуска масс-спектрометра. Известно, что при длительном дроблении природного каменного материала в составе выделяющихся благородных газов увеличивается доля радиогенных изотопов за счет процессов радиоактивного распада *in situ* [14]. Для минимизации вклада  $^4\text{He}$ , образующегося при распаде U и Th, нами измерялся изотопный состав только первой порции гелия после 1000 ударов. Сопутствующие газы осаждались на криогенной ловушке (активированный уголь, охлажденный жидким азотом при  $77^\circ\text{K}$ ), а гелий дополнительно очищался титановыми геттерами. Калибровка чувствительности прибора и масс-дискриминации контролировалась регулярным измерением эталона с воздушным изотопным со-



**Рис. 1.** Концентрации гелия, урана и тория (а), отношения  $^4\text{He}/^3\text{He}$  и  $(\text{U}+0.24\text{Th})/^3\text{He}$  (б) в магматическом флюиде из магнетита интрузивных массивов Прихубсугулья. 1–3 – магматическая формация (ассоциация), изверженная порода, массив: 1 – габбро-сиенитовая, субщелочное габбро, Додтам-Гол; 2 – щелочно-габброидная, якупирангит и ийолит-уртит, Бэлтэсин-Гол, монзонит, Овермараат-Гол; 3 – щелочно-сиенитовая, щелочной сиенит, Бурэнхан-Обо, щелочной и нефелиновый сиениты, Барунман-Хан (см. табл. 1). Коэффициент 0.24Th отражает степень продуктивности тория в отношении гелия по сравнению с ураном.

ставом гелия по схеме стандарт–образец–стандарт. Значения бланка для  $^4\text{He}$  не превышали  $1 \times 10^{-9}$  см³/г. Ошибки измерения ( $\pm 1\sigma$ ) концентрации He (метод высоты пика) и отношения  $^3\text{He}/^4\text{He}$  составили 5 и 5–20% соответственно. Результаты анализа приведены в табл. 1. Влияние радиогенного  $^4\text{He}$  *in situ* оценивалось по количеству U и Th (данные ICP–MS, см. табл. 1) в пудре, оставшейся после измельчения магнетита.

Измеренное содержание  $^4\text{He}$  в мономинеральных пробах магнетита варьирует в диапазоне от  $6.6 \times 10^{-7}$  до  $1.1 \times 10^{-5}$  см³/г. Его количество в интрузивных фазах одного плутона (массивы Бэлтэсин-Гол, Барунман-Хан) может отличаться на порядок, но изотопное отношение  $^3\text{He}/^4\text{He}$  в большинстве образцов находится в относительно узком интервале значений 0.23–0.59 *Ra*. По сравнению с другими интрузиями, только флюид в магнетите из субщелочного габбро массива Додтам-Гол имеет значение  $^3\text{He}/^4\text{He}$  выше атмосферного (2.51 *Ra*, см. табл. 1). Подобные изотопные метки могут свидетельствовать как о смешении мантийного и корового вещества, так и о вероятном обогащении изотопом  $^4\text{He}$  в результате радиоактивного распада U и Th. При относительно небольших количествах U ( $\sim 1$ –10 мкг/г) и Th (до 22.5 мкг/г) в изученных образцах магнетита наблюдается тенденция одновременного роста содержаний He и величины (U+0.24Th), что косвенно указывает на образование существенной части  $^4\text{He}$  в результате радиоактивного распада *in situ* (рис. 1 а). На диаграмме отношений  $^4\text{He}/^3\text{He}$  и  $(\text{U}+0.24\text{Th})/^3\text{He}$  (рис. 1 б) минеральные составы

образуют линейные тренды, за исключением магнетита в субщелочном габбро массива Додтам-Гол. Их наличие показывает, что вклад радиогенного  $^4\text{He}$  действительно оказал влияние на изотопные параметры гелия. По-видимому, разный наклон линий регрессии, рассчитанных для магнетитов из интрузивов щелочно-габброидной и щелочно-сиенитовой формаций, отражает время, в течение которого накапливался радиогенный  $^4\text{He}$ . При этом для минералов более молодых магматических ассоциаций их наклон закономерно меньше, чем для древних. Значение  $\sim 1.15 \times 10^6$  на оси  $^4\text{He}/^3\text{He}$  в точке пересечения линий регрессии эквивалентно отношению  $R/R_a \sim 0.63$ , которое могло быть у флюида, захваченного при кристаллизации магнетита. Если генерация первичной магмы при формировании этих интрузивных комплексов происходила с участием вещества SCLM-типа ( $\sim 6 Ra$ ) или менее обогащенного  $^3\text{He}$  ( $\sim 4$ –5 *Ra*) плюмоподобного источника [9, 15] и верхнекоровых пород (0.01–0.05 *Ra*) [10], то расчетная доля мантийного гелия [16] во флюиде могла составлять только 10–15%. Согласно предложенной модели субщелочное габбро массива Додтам-Гол должно содержать  $\sim 40$ –60% мантийного компонента.

Таким образом, несмотря на разную формационную принадлежность интрузивных пород Прихубсугулья, выявленные особенности изотопного состава гелия в акцессорном магнетите свидетельствуют о возможной коровой контаминации их первичных глубинных расплавов. Это согласуется с представлениями о совместном участии вещества мантии и континентальной коры в разви-

тии щелочного и субщелочного магматизма складчатых областей [3–6]. В соответствии с существующими геотектоническими реконструкциями Тувино-Монгольского докембрийского террейна и общей структуры каледонид ЦАСП [17, 18], мы предполагаем взаимодействие изученных интрузий с фрагментами древних аккреционно-коллизийных комплексов. Сходный характер смешения изотопов гелия в расплавах и флюидах может также служить косвенным признаком развития мантийного магматизма в обстановке активной транзитали.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны сотрудникам Томского национального исследовательского государственного университета и Института геологии и геохимии Уральского отделения Российской академии наук за помощь в аналитических исследованиях. С благодарностью восприняты рецензии от сотрудников институтов РАН А.И. Буйкина (ГЕОХИ) и О.В. Якубович (ИГГД).

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования проведены за счет средств Российского научного фонда (проект 19-77-10039П; изотопный анализ гелия) и Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание НИ ТГУ, проект 0721-2020-0041; геология плутонов).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ernst R.E.* Large igneous provinces. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 630 p.
2. *Gwalani L.G., Moore K., Simonetti A.* Carbonatites, alkaline rocks and the mantle: a special issue dedicated to Keith Bell // *Mineralogy and Petrology*. 2010. V. 98. P. 5–10.
3. *Nikiforov A.V., Yarmolyuk V.V.* Late Mesozoic carbonatite provinces in Central Asia: Their compositions, sources and genetic settings // *Gondwana Research*. 2019. V. 69. P. 56–72.
4. *Vrublevskii V.V., Nikiforov A.V., Sugorakova A.M., Kozulina T.V.* Petrogenesis and tectonic setting of the Cambrian Kharly alkaline–carbonatite complex (Sangilen Plateau, Southern Siberia): Implications for the Early Paleozoic evolution of magmatism in the western Central Asian Orogenic Belt // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2020. V. 188. 104163.
5. *Врублевский В.В., Гертнер И.Ф.* Палеозойские щелочно-мафитовые интрузии Кузнецкого Алатау, их источники и условия образования расплавов // *Петрология*. 2021. Т. 29. № 1. С. 31–63.
6. *Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Savatenkov V.M.* Alkaline magmatism of the Vitim province, West Transbaikalia, Russia: Age, mineralogical, geochemical and isotope (O, C, D, Sr and Nd) data // *Lithos*. 2012. V. 152. P. 157–172.
7. *Izbrodin I., Doroshkevich A., Rampilov M., Lastochkin E., Savatenkov V., Posokhov V., Khubanov V., Redina A.* Age and petrogenesis of scapolite gabbro from the Bambuy intrusion (Vitim plateau, Russia) and their tectonic significance // *International Journal of Earth Sciences*. 2022. V. 111. P. 1859–1883.
8. *Stuart F.M., Lass-Evans S., Fitton J. G., Ellam R.M.* High  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios in picritic basalts from Baffin Island and the role of a mixed reservoir in mantle plumes // *Nature*. 2003. V. 424. N 6944. P. 57–59.
9. *Gautheron C., Moreira M.* Helium signature of the subcontinental lithospheric mantle // *Earth and Planetary Science Letters*. 2002. V. 199. P. 39–47.
10. *Mamyrin B.A., Tolstikhin I.N.* Helium isotopes in nature. Amsterdam, New York: Elsevier, 1984. 288 p.
11. *Яшина Р.М.* Щелочной магматизм складчато-глыбовых областей (на примере южного обрамления Сибирской платформы). М.: Наука, 1982. 274 с.
12. *Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Ernst R.E., Izokh A.E., Vishnevskii A.V.* The Overmarat–Gol alkaline pluton in Northern Mongolia: U–Pb age and preliminary implications for magma sources and tectonic setting // *Minerals*. 2019. V. 9 (3). Art. 170.
13. *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.
14. *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.
15. *Moreira M., Doucelance R., Kurz M.D., Dupré B., Allègre C.J.* Helium and lead isotope geochemistry of the Azores Archipelago // *Earth and Planetary Science Letters*. 1999. V. 169. P. 189–205.
16. *Kendrick M.A., Burgess R., Patrick R.A.D., Turner G.* Fluid inclusion noble gas and halogen evidence on the origin of Cu-porphyry mineralizing fluids // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. V. 65. P. 2651–2668.
17. *Кузьмичев А.Б.* Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы. (Ред. Е.В. Складаров). Москва: ПРОБЕЛ-2000, 2004. 192 с.
18. *Ярмолук В.В., Кузьмин М.И., Воронцов А.А.* Конвергентные границы западно-тихоокеанского типа и их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса // *Геология и геофизика*. 2013. Т. 54. № 12. С. 1831–1850.

## HELIUM ISOTOPIC COMPOSITION IN ALKALINE INTRUSIONS OF THE HOVSGOL AREA, NORTHWESTERN MONGOLIA

V. V. Vrublevskii<sup>a, #</sup>, A. A. Petlina<sup>a</sup>, A. V. Gudkov<sup>b</sup>, M. Yu. Sidorov<sup>b</sup>, A. S. Semiryakov<sup>a</sup>, R. A. Shelepaev<sup>c, d</sup>, A. V. Vishnevskii<sup>c, d</sup>, I. F. Gertner<sup>a</sup>, E. N. Fomina<sup>b</sup>, E. N. Kozlov<sup>b</sup>, and O. V. Udoratina<sup>e</sup>

<sup>a</sup>National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

<sup>b</sup>Geological Institute of Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

<sup>c</sup>Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>d</sup>National Research Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>e</sup>Institute of Geology Komi, Ural branch of Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russian Federation

<sup>#</sup>E-mail: vasvr@yandex.ru

Presented by Academician of the RAS V.V. Reverdatto February 14, 2023

The helium isotope composition of fluid inclusions has been studied in magnetite from alkaline and subalkaline intrusions of the Hovsgol area in NW Mongolia. The measured content of  $^4\text{He}$  is in the range from  $6.6 \times 10^{-7}$  to  $114 \times 10^{-7}$  cm<sup>3</sup>/g. The  $^3\text{He}/^4\text{He}$  isotopic ratio of most samples varies within 0.23–0.59 *Ra* and may indicate the presence of helium from different sources in the magmatogenic fluid. The largest amount of mantle He (2.51 *Ra*) is hosted by the magnetite of the subalkaline gabbro. During the generation of primary magma, which probably involved either SCLM-type material or a plume-like reservoir less enriched in  $^3\text{He}$ , the mantle component accounted for approximately 40–60%. In the evolution of foid and alkali-syenite melts, its share did not exceed ~10–15% due to mixing with crustal radiogenic He. We assume that the intrusions interacted with fragments of Precambrian accretionary-collisional complexes of the Tuva-Mongolian terrane. Such mixing of He isotopes in melts and fluids may be regarded as circumstantial evidence supporting the development of mantle magmatism at the active continental margin.

**Keywords:** alkaline and subalkaline plutonic magmatism, helium isotopes, mantle-crustal interaction, Hovsgol trough, Northwestern Mongolia