

ПЕТРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 550.42: 552.3(571.513)

doi: 10.17223/25421379/25/2

ПРИРОДА ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В ЩЕЛОЧНЫХ И СУБЩЕЛОЧНЫХ БАЗАЛЬТАХ СЕВЕРО-МИНУСИНСКОЙ ВПАДИНЫ, ЮЖНАЯ СИБИРЬ

Василий Васильевич Врублевский¹, Алексей Дмитриевич Котельников²,
Фериде Казенова³, Иван Олегович Кремер⁴, Платон Алексеевич Тишин⁵



^{1, 2, 3, 4, 5} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ vasvr@yandex.ru

² geokart@ggf.tsu.ru

³ feride.kazenova@mail.ru

⁴ kremer.ivan.1992@mail.ru

⁵ tishin_pa@mail.ru

Аннотация. Изучен изотопный состав кислорода разновозрастных базальтоидов в северной части Минусинского рифтогенного прогиба. Вариации значений $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ (от $-0,7$ до $+8,8$ ‰) в вулканитах указывают на мантийное происхождение первичных расплавов, а также на их коровую контаминацию с вероятным участием низкотемпературных гидротерм и метеорных вод. В отличие от субщелочных базальтов раннего девона, долериты пермо-триаса и позднемеловые базаниты являются магматическими производными более обогащенных HFS-элементами глубинных резервуаров. Предполагается, что гетерогенность источников базальтового вулканизма обусловлена процессами плюм-литосферного взаимодействия и декомпрессионного плавления модифицированной верхней мантии.

Ключевые слова: субщелочной базальт, долерит, базанит, изотопы кислорода, мантия, контаминация, Минусинский прогиб

Источник финансирования: исследования проведены за счет средств Российского научного фонда (проект № 22–27–00362).

Для цитирования: Врублевский В.В., Котельников А.Д., Казенова Ф., Кремер И.О., Тишин П.А. Природа изотопно-кислородной неоднородности в щелочных и субщелочных базальтах Северо-Минусинской впадины, Южная Сибирь // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 36–47. doi: 10.17223/25421379/25/2

Original article

doi: 10.17223/25421379/25/2

ORIGIN OF THE OXYGEN ISOTOPE HETEROGENEITY FOR ALKALINE AND SUBALKALINE BASALTS IN THE NORTHERN MINUSA DEPRESSION, SOUTHERN SIBERIA

Vassily V. Vrublevskii¹, Alexey D. Kotelnikov², Feride Kazenova³, Ivan O. Kremer⁴, Platon A. Tishin⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ vasvr@yandex.ru

² geokart@ggf.tsu.ru

³ feride.kazenova@mail.ru

⁴ kremer.ivan.1992@mail.ru

⁵ tishin_pa@mail.ru

Abstract. In the Minusa trough of the Altai-Sayan paleorift area, basalt magmatism of different ages is manifested. In the northern part of the trough (the Northern Minusa Depression), Early Devonian subalkaline basalts predominate among its products, small intrusions of Permian-Triassic dolerites and diatremes of Late Cretaceous basanites are less common. The oxygen isotopic composition in whole-rock basaltoids was studied by the laser ablation method with preliminary laser-fluorination. The $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ ratio variations from $+5.4$ to $+7.6$ ‰ in basanites and dolerites are partially comparable with the MORB parameters and do not go beyond the range of intraplate oceanic and continental basalts. Apparently, this indicates the mantle origin of the primary melt and the presence of a sublithospheric plume substance in it. The values of $\delta^{18}\text{O} > +6$ ‰ in mafic rocks (up to

+ 8.8 ‰ in subalkaline basalts) may indicate crustal contamination of magma, but in most samples the equilibrium with "normal-magmatic" water is maintained. For some dolerites with a value of $\#Mg < 45$, an isotopic inversion with $\delta^{18}O$ from -0.7 to $+4$ ‰ is recorded, due to the probable participation of meteoric waters in a low-temperature hydrothermal fluid. According to the totality of data on isotopic composition and distribution of HFS elements in rocks, we assume that, unlike basalt eruptions in the Early Devonian, dolerite and especially basanite melts are derivatives of deeper and enriched reservoirs. Heterogeneity of magmatic sources was associated with the processes of plume-lithospheric interaction and decompression melting of the modified upper mantle.

Keywords: subalkaline basalt, dolerite, basanite, oxygen isotopes, mantle, contamination, Minusa trough

Source of financing: The study was supported by the Russian Science Foundation, grant no. 22-27-00362.

For citation: Vrublevskii V.V., Kotelnikov A.D., Kazenova F., Kremer I.O., Tishin P.A. (2022) Origin of the oxygen isotope heterogeneity for alkaline and subalkaline basalts in the Northern Minusa depression, Southern Siberia. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 36–47. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/25/2

Введение

Изотопный состав кислорода в изверженных породах является одним из индикаторов эволюции глубинных магм при их взаимодействии с веществом корового происхождения, метеорными водами и низкотемпературными гидротермами [Taylor, 1968; Taylor, Sheppard, 1986; Deines, 1989; Demeny et al., 1998; Покровский, 2000]. Продукты сублитосферной мантии, незатронутые контаминационными процессами, характеризуются очень однородным составом. По разным оценкам, величина $\delta^{18}O_{SMOW}$ в мантийных перидотитах и океанических базальтах варьирует в интервале $5,5 \pm 0,5$ и $5,7 \pm 0,2$ ‰ [Taylor, Sheppard, 1986; Ito, White, Gopel, 1987; Matthey, Lowry, Macpherson, 1994; Harmon, Hoefs, 1995; Eiler et al., 1997; Eiler, 2001]. Кроме того, частичное плавление мантии не сопровождается заметным фракционированием изотопов кислорода, что позволяет судить о природе источников первичных магм [Покровский, 2000].

В формировании многих изверженных провинций совместно участвуют производные внутриплитного базальтового магматизма разного возраста и уровня щелочности. В составе вулканических серий наряду с обычно доминирующими субщелочными базальтоидами выделяются нефелиниты, базаниты и тефриты [Furman, 1995; Trumbull et al., 2003; Jung et al., 2012; Hunt et al., 2012; Ernst, 2014; Медведев и др., 2020; Ярмолюк и др., 2020; Vorontsov et al., 2021]. Считается, что особенности их редкоземельного и изотопного состава могут быть обусловлены изменением как масштабов плюм-литосферного взаимодействия, так и условий плавления глубинных протолитов. В этой связи диапазон значений $\delta^{18}O \approx 5\text{--}6$ ‰, установленный для подобных пород, будет являться важным признаком мантийного происхождения исходных магм.

Эффекты «телескопирования» разновозрастного базальтового магматизма наблюдаются в Центральном-Азиатском складчатом поясе (ЦАСП) [Ярмолюк

и др., 2020; Vorontsov et al., 2021]. Примером могут служить вулканы и малые интрузии, распространенные в Минусинском рифтогенном прогибе девона между каледонскими сооружениями Кузнецкого Алатау, Восточного и Западного Саяна. Полученные нами первые данные по изотопному составу кислорода в субщелочных и щелочных базальтоидах позволяют более определенно судить об источниках первичных расплавов и характере их взаимодействия с коровым субстратом.

Геология и химические особенности базальтоидов

В Минусинском прогибе среди вулканитов преобладают раннедевонские субщелочные базальты, характерные для формирующейся Алтае-Саянской рифтовой области [Vorontsov et al., 2021]. В северной части прогиба (Северо-Минусинская впадина) они образуют Копьевское куполовидное поднятие (рис. 1). Окружающие его терригенные и карбонатные отложения девона–раннего карбона прорваны дайками (до $10\text{--}40 \times 500\text{--}1\,500$ м) и мелкими ($\varnothing = 50\text{--}100$ м) штоками пермско-триасовых долеритов, а также поздне меловыми базанитовыми диатремами размером до 600 м в поперечнике. Эксплозивные трубки сосредоточены в виде трех ареалов (~ 200 км²) на северном, южном и западном флангах поднятия [Крюков, 1964; Malkovets et al., 2003].

Долериты и базаниты характеризуются повышенным содержанием TiO_2 (2–3,5 мас. %), переменной кремнекислотностью (SiO_2 41–49 мас. %) и щелочностью ($Na_2O + K_2O$ 2,4–5,8 мас. %). Менее титанистые (TiO_2 1–1,8 мас. %) субщелочные базальты девона имеют сходство с ними по TAS-параметрам (рис. 2, а). В долеритах наблюдается больше CaO (9–13 мас. %) и меньше MgO (5–8 мас. %), чем в базанитах (CaO 8–10 мас. %, MgO 7–11 мас. %). Снижение магнезиальности сопровождается уменьшением в породах концентраций совместимых микроэлементов (Cr 100–400, Ni 90–260, V 150–380, г/т). Базаль-

тоиды заметно различаются между собой по уровню и характеру накопления HFSE и LILE [Врублевский и др., 2022]. Спектры распределения микроэлементов в долеритах и базанитах имеют сходную конфигурацию с отчетливым Nb-Ta максимумом, который обычно отмечается для продуктов ОИВ-магматизма (рис. 2, *b*). В образовании долеритов и особенно девонских базальтов дополнительно могло участвовать вещество, подобное IAB и E-MORB (рис. 2, *b, c*), сохранившееся в виде фрагментов палеоокеанической окраины. Вариации отношения Zr/Nb от 1,8–2,4 в базанитах до 4–7,7 в долеритах свидетельствуют о генерации первичных расплавов в мантии с разным уровнем обогащения HFSE (рис. 2, *d*).

По этому показателю изученные породы аналогичны меловым и кайнозойским плюмовым щелочным базальтоидам Монголии, Забайкалья, Центральной Европы, Восточной и Южной Африки и сопоставимы с производными ОИВ-вулканизма как HIMU, так и EM типа (Zr/Nb 2,7–5,5 и 3,5–8,4 соответственно; по [Weaver, 1991]). В большинстве девонских субщелочных базальтов Копьевского купола фиксируются сравнительно высокие значения $Zr/Nb \approx 12$ –18, сходные с составом гидратированной мантии подобно пермско-триасовым траппам и долеритам Кузнецкого и Тунгусского бассейнов (рис. 2, *d*).

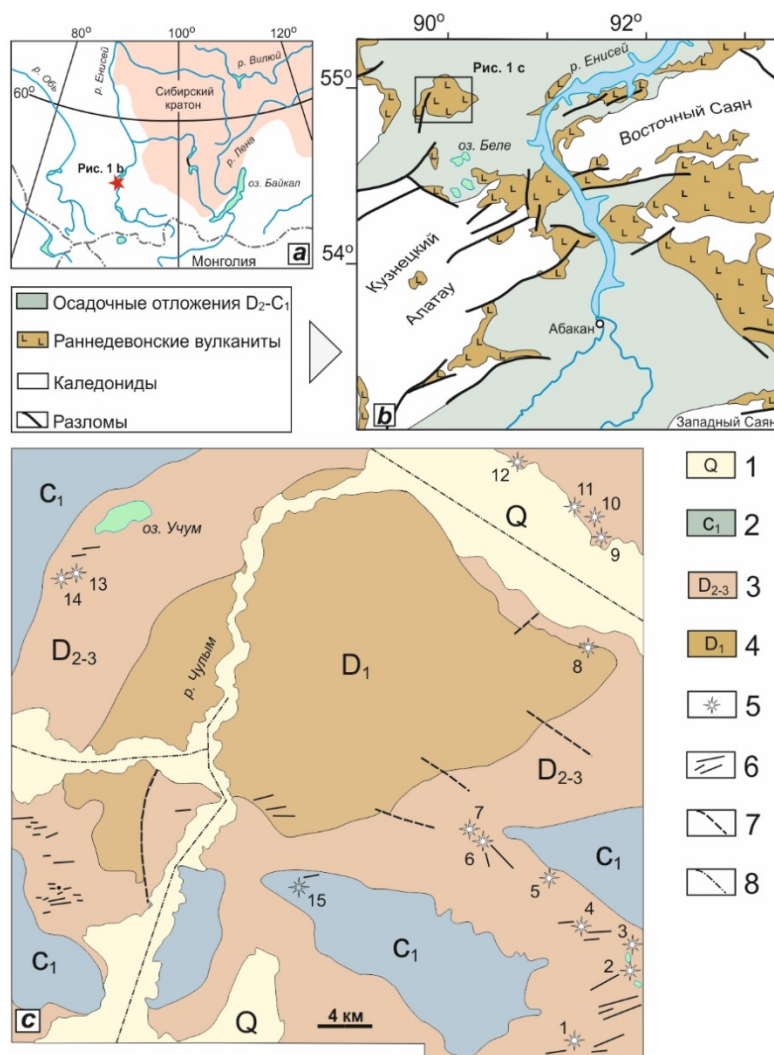


Рис 1. Расположение и геологическое строение Минусинского прогиба

a – географическое положение (красная звезда); *b* – геологическая схема Минусинского прогиба [Vorontsov et al., 2021]; *c* – строение Копьевского поднятия и ареалы распространения изученных диатрем базанитов и даек долеритов (литературные и наши данные). 1 – четвертичные отложения, 2 – терригенно-карбонатные отложения раннего карбона, 3 – терригенные отложения среднего и позднего девона, 4 – раннедевонские вулканиты, 5 – позднемеловые диатремы базанитов (вне масштаба), 6 – пермско-триасовые дайки долеритов (вне масштаба), 7 – дизъюнктивные нарушения, 8 – предполагаемые тектонические нарушения

Fig. 1. Location and geological structure of the Minusa trough

a – Geographical location (red star); *b* – Geological sketch of the Minusa trough [Vorontsov et al., 2021]; *c* – The Kopevskoye uplift structure and the areas of studied basanite diatremes and dolerite dikes (literature and our data). 1 – Quaternary deposits, 2 – Early Carboniferous clastic-carbonate sediments, 3 – Middle and Late Devonian clastics, 4 – Early Devonian volcanics, 5 – Late Cretaceous basanite diatremes (shown out of scale), 6 – Permian-Triassic dolerite dikes (shown out of scale), 7 – faults, 8 – suspected faults

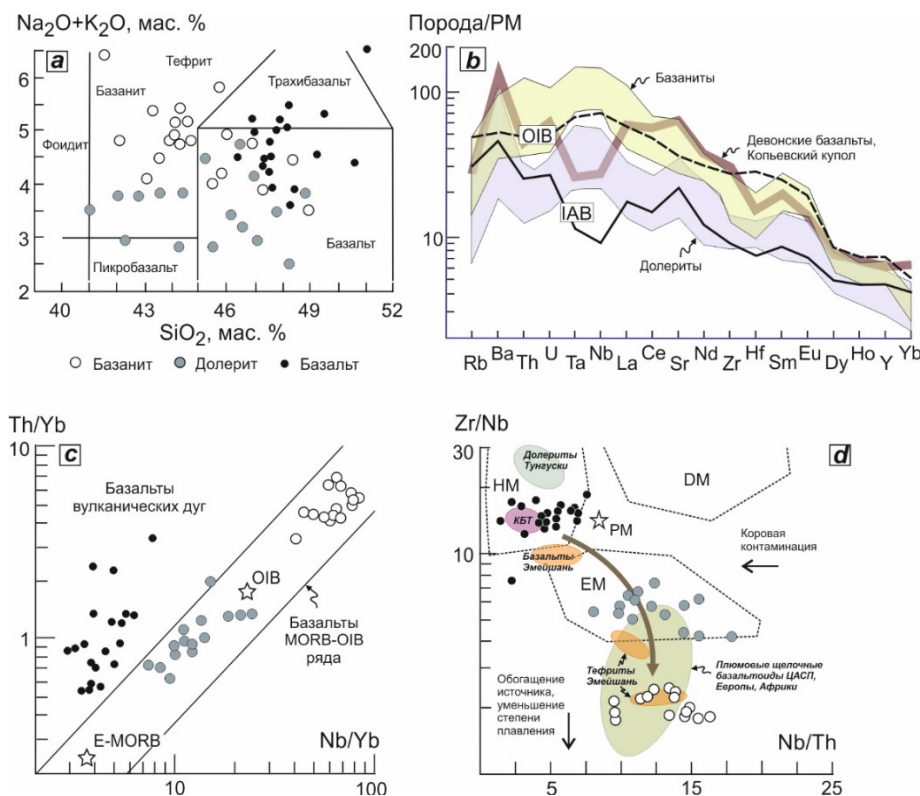


Рис. 2. Геохимические особенности базальтоидов Минусинского прогиба

a – петрохимическая *TAS*-систематика; *b* – распределение LILE и HFSE. PM = примитивная мантия [Sun, McDonough, 1989], средние составы базальтов океанических островов (OIB) [Sun, McDonough, 1989] и островных дуг (IAB) [Kelemen, Hanghøj, Greene, 2003], девонские субщелочные базальты Копьевского купола (черные точки) [Воронцов, Федосеев, Андриященко, 2013; Vorontsov et al., 2021; устное сообщение А.А. Воронцова]; *c* – Th/Yb–Nb/Yb диаграмма [Pearce, 2008]. E–MORB = средний состав обогащенных базальтов срединно-океанических хребтов; *d* – Zr/Nb–Nb/Th [Condie, Shearer, 2017]. Выделены области магматических источников в гидратированной (HM), деплетированной (DM) и обогащенной (EM) мантии. Показаны составы плюмовых щелочных базальтоидов Азии (ЦАСП), Центральной Европы, Восточной и Южной Африки [Furman, 1995; Trumbull et al., 2003; Jung et al., 2012; Hunt et al., 2012; Castillo, Hilton, Halldórsson, 2014; Ярмолюк и др., 2020; Vorontsov et al., 2021], базальтов и тефритов изверженной провинции Эмейшань [Song et al., 2008], траппов Кузнецкого прогиба (КБТ) [Svetlitskaya, Nevolko, 2016], долеритовых силлов бассейна р. Тунгуски [Callegaro et al., 2021]. Вероятный тренд эволюции мантийных источников базальтоидов Минусинского прогиба указан стрелкой. Химические анализы выполнены методами ICP–OES и ICP–MS на оборудовании ЦКП ТГУ «Геохимия природных систем» (грант Минобрнауки РФ 075–15–2021–693/13.ЦКП.21.0012)

Fig. 2. Geochemical features of the Minusa trough basaltoids

a – Chemical *TAS*-systematics; *b* – LILE and HFSE distribution. PM = primitive mantle [Sun, McDonough, 1989], and average compositions of oceanic island basalts (OIB) [Sun, McDonough, 1989], island-arc basalts (IAB) [Kelemen, Hanghøj, Greene, 2003], and Devonian subalkaline basalts of the Kopevko dome (black points) [Vorontsov, Fedoseev, Andryushchenko, 2013; Vorontsov, 2021; oral report by A.A. Vorontsov] are shown; *c* – Th/Yb–Nb/Yb diagram [Pearce, 2008]. E–MORB = average composition of enriched mid-ocean ridge basalts; *d* – Zr/Nb–Nb/Th [Condie, Shearer, 2017]. The areas of magmatic sources in the hydrated (HM), depleted (DM) and enriched (EM) mantle are identified. The compositions of the Asia (CAFB), Central Europe, and East and South Africa plume alkaline basaltoids [Furman, 1995; Trumbull et al., 2003; Jung et al., 2012; Hunt et al., 2012; Castillo, Hilton, Halldórsson, 2014; Ярмолюк и др., 2020; Vorontsov et al., 2021], basalts and tephrites of the Emeishan igneous province [Song et al., 2008], Kuznetsk basin traps (KBT) [Svetlitskaya, Nevolko, 2016], and dolerite sills of the Tunguska River basin [Callegaro et al., 2021] are shown. The probable trend for evolution of mantle sources of the Minusa trough basaltoids is indicated by the arrow. Chemical analyses were performed by ICP–OES and ICP–MS methods on the equipment of the TSU Analytical Center of Natural Systems Geochemistry (by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation grant no. 075–15–2021–693/no. 13.RFC.21.0012)

Согласно моделям, имитирующим условия генерации мафитовых магм, происхождение наиболее обогащенных HFS- и LIL-элементами базанитов связано с процессом декомпрессионного плавления ($\approx 1\text{--}2\%$) перидотита гранат-шпинелевой фазии в субконтинентальной литосферной мантии [Врублев-

ский и др., 2022]. Ксенолиты подобных перидотитов наблюдаются в некоторых диатремах вблизи Копьевского поднятия [Malkovets et al., 2003]. Образование долеритовой магмы могло происходить при частичном ($\approx 2\text{--}5\%$) изобарном плавлении менее глубокого шпинелевого перидотита и воздействии суб-

литосферного мантийного плюма. Девонские субщелочные базальты Копьевского поднятия представляют собой продукты низкой степени (1–4 %) плавления шпинелевого лерцолита.

Методика и результаты изотопного анализа кислорода в базальтоидах

Измерение изотопного состава кислорода в валовых пробах базальтоидов выполнено сотрудниками Геологического института СО РАН (Улан-Удэ) на газовом масс-спектрометре Finnigan MAT-253 с двойной системой напуска. При подготовке образцов к анализу применялся метод лазерного фторирования с BrF_5 . Выделение O_2 из силикатной матрицы осуществлялось в режиме лазерной абляции [Sharp, 1990] на установке MIR 10–30 с CO_2 -лазером (100 ватт, $\lambda = 10,6$ мкм) и вакуумной магистралью для очистки выделенного газа. Нагрев до 1 000 °C дает возможность анализировать тугоплавкие минералы (оливин, циркон, гранат). Процесс полного сгорания образца фиксируется визуально по монитору. При высокой температуре и скорости реакции возможность фракционирования изотопов кислорода и загрязнение газа атмосферными примесями практически исключены.

Результаты изотопного анализа пород представлены в таблице. Величина $\delta^{18}\text{O}$ приведена в промилле относительно значения V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). Аналитическая ошибка (1 s) определения $\delta^{18}\text{O}$ не превышает $\pm 0,2$ ‰. Достоверность результатов контролировалась измерениями лабораторных (кварц ГИ-1, Polaris) и международных (кварц NBS-28, биотит NBS-30) стандартов.

Изотопный состав кислорода в базанитах неоднороден и характеризуется вариациями значений $\delta^{18}\text{O}$ в интервалах от +5,44 до 5,94 ‰ для диатрем северного ареала (за исключением Марской трубки) и от +6,39 до +7,07 ‰ (главным образом, диатремы южного ареала). Очевидно, только средняя величина $\delta^{18}\text{O} + 5,73$ ‰ для первой группы значений совпадает с диапазоном $5,7 \pm 0,2$ ‰ в производных мантии (рис. 3). В долеритах также проявлена дискретность отношений $\delta^{18}\text{O}$. Наряду с относительно обогащенными тяжелым ^{18}O разновидностями ($\delta^{18}\text{O}$ от +6,49 до +7,64 ‰) встречаются породы (отдельные участки в дайках?) с более «легким» ($\delta^{18}\text{O}$ от –0,68 до +4,03 ‰) изотопным составом кислорода. По сравнению с базанитами и долеритами, самые высокие значения $\delta^{18}\text{O} = +8,8$ ‰ получены для двух образцов девонских субщелочных базальтов Копьевского поднятия (рис. 3).

Изотопный состав кислорода в базальтоидах Минусинского прогиба

Oxygen isotopic composition for Minusa trough basaltoids

Эруптивное тело, локализация	Порода	Образец	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	#Mg	SiO_2 , мас. %	LOI, мас. %
Трубка Бараджульская	Базанит	T01/2	+6,39	57,9	43,27	1,20
Трубка Тергешская	»	T02/2	+6,63	55,1	44,28	2,34
Трубка Чебалдагская	»	T03/2	+6,85	58,0	47,24	0,88
Трубка Красноозерская	»	T04/1	+6,75	58,0	43,88	0,63
Трубка Беле	»	K-8/2	+7,07	47,6	48,99	1,72
Трубка Марская	»	T10/1	+5,44	49,6	45,71	1,65
	»	0204	+5,84	49,4	48,37	1,36
Трубка Высота 465	»	T05/2	+5,92	53,1	44,12	0,87
Трубка Конгаровская	»	T06/2	+5,75	62,9	42,06	2,13
	»	T06/3	+5,46	58,2	44,60	1,93
Трубка Три брата	»	T07/2	+5,94	53,8	44,81	0,74
Трубка Камыштинская-2	»	T09/1	+6,90	44,7	43,98	1,27
Дайки, заповедник Подзаплоты	Долерит	ПП2А	+7,64	45,7	46,91	1,18
	»	ПК1	–0,68	34,9	42,68	2,86
Дайки, оз. Черное	»	K-2/2	+3,14	44,6	46,52	3,69
	»	092	+2,91	44,7	44,37	2,54
Дайки, оз. Беле	»	K-9/1	+7,17	45,2	48,72	2,79
	»	K-6/5	+4,03	44,9	47,00	4,81
Дайка, оз. Учум	»	064	+6,51	49,5	44,04	3,85
Шток, г. Чирья	»	ПП6	+6,49	52,3	46,10	2,12
Дайка, зап. Подзаплоты	Базальт	012	+8,78	55,9	49,25	3,39
Дайка, д. Копьево	»	141	+8,75	43,2	48,12	1,88

Примечание. #Mg = 100MgO/(MgO + FeO), мол. %. LOI – потери при прокаливании.

Note. #Mg = 100MgO/(MgO + FeO), mol. %. LOI – loss on ignition.

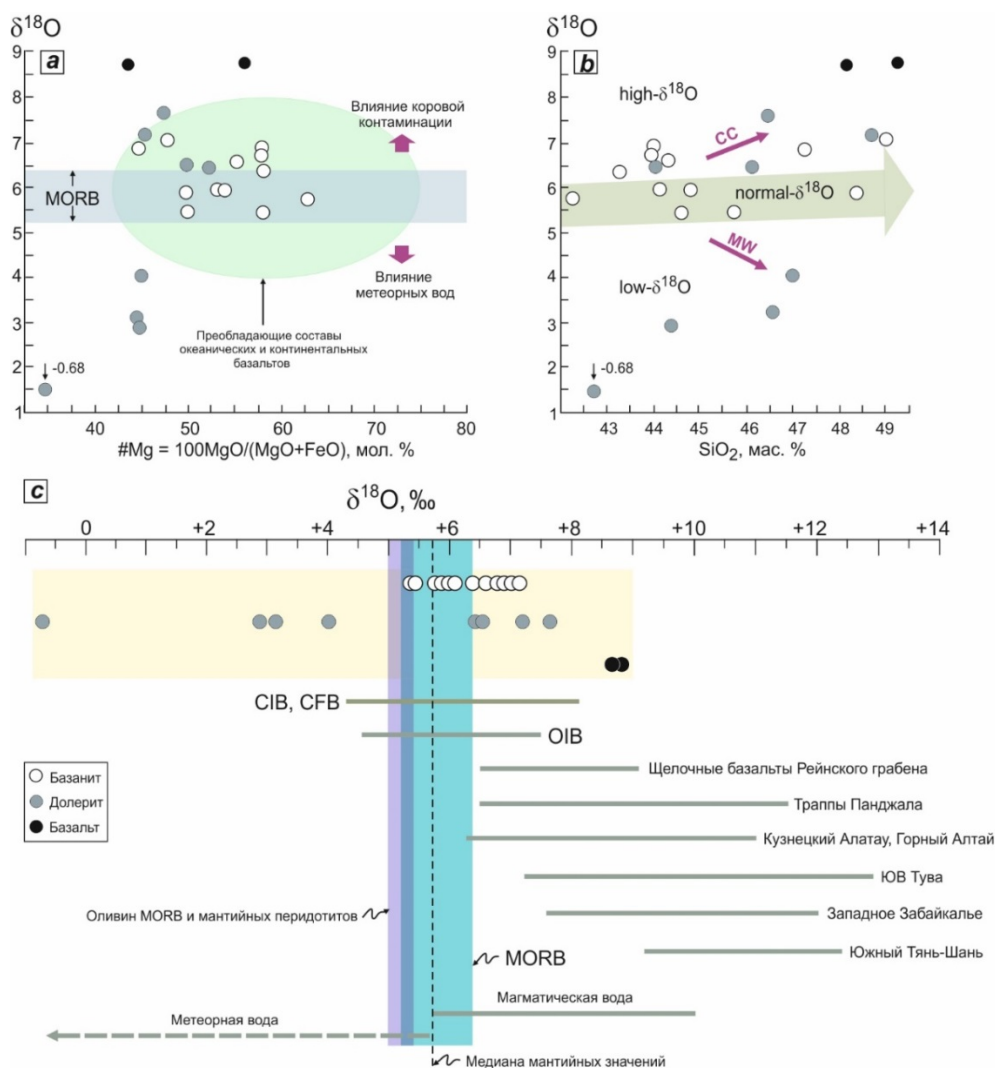


Рис. 3. Изотопный состав кислорода в базальтоидах Минусинского прогиба

$a - \delta^{18}\text{O} - \#Mg$ диаграмма: показаны область преобладающих составов океанических и континентальных базальтов, MORB-диапазон значений $\delta^{18}\text{O}$, по [Harmon, Hoefs, 1995], изотопные сдвиги (стрелки сиреневого цвета), по [Покровский, 2000]; $b - \delta^{18}\text{O} - \text{SiO}_2$ диаграмма: показаны области дифференцированных магматических серий с высокими (high- $\delta^{18}\text{O}$), нормальными (normal- $\delta^{18}\text{O}$) и низкими (low- $\delta^{18}\text{O}$) изотопными соотношениями, по [Troch et al., 2020]. Стрелками «CC» и «MW» обозначены тренды значений $\delta^{18}\text{O}$ в результате коровой контаминации или воздействия метеорных вод соответственно; c – сравнение базальтоидов по соотношению изотопов кислорода: OIB = базальты океанских островов, CIB = внутриплитные континентальные базальты, CFB = континентальные платобазальты, MORB = базальты срединно-океанических хребтов [Harmon, Hoefs, 1995]. Показаны составы оливина в мантийных перидотитах и MORB [Mattey, Lowry, Macpherson, 1994; Eiler et al., 1997], щелочного базальта, базанита и нефелинита Рейнского грабен-рифта (Центральная Европа) [Jung, Hoernes, 2000], траппов Панджала (СЗ Индия) [Shellnutt, Rehman, Manu Prasanth, 2021], медиана мантийных значений [Rollinson, 1993] и диапазон магматической и метеорной воды [Rollinson, 1993; Покровский, 2000]. Данные по щелочным и субщелочным изверженным породам Кузнецкого Алатау, юго-востока Горного Алтая, нагорья Сангилен в Юго-Восточной Туве, Витимского плато в Западном Забайкалье, Южного Тянь-Шаня, по [Покровский и др., 1998; Doroshkevich et al., 2012; Врублевский и др., 2012; Врублевский, Котельников, Изох, 2018; Vrublevskii et al., 2018, 2020; Врублевский, Гертнер, 2021]

Fig. 3. Oxygen isotopic composition in the Minusa trough basalts

$a - \delta^{18}\text{O}$ vs. $\#Mg$ plot: the area of predominant oceanic and continental basalts, the range of MORB $\delta^{18}\text{O}$ values [Harmon, Hoefs, 1995], and isotopic shifts (purple arrows) [Pokrovsky, 2000] are shown; $b - \delta^{18}\text{O}$ vs. SiO_2 plot: the areas of differentiated magmatic series with high- $\delta^{18}\text{O}$, normal- $\delta^{18}\text{O}$ and low- $\delta^{18}\text{O}$ values [Troch et al., 2020] are shown. The arrows «CC» and «MW» mark the trends of $\delta^{18}\text{O}$ -values because of crustal contamination or the influence of meteoric waters, respectively; c – Comparison of basalts by oxygen isotope ratio: OIB = oceanic islands basalts, CIB = intraplate continental basalts, CFB = continental flood basalts, MORB = mid-ocean ridge basalts [Harmon, Hoefs, 1995]. The compositions of olivine in mantle peridotites and MORB [Mattey, Lowry, Macpherson, 1994; Eiler et al., 1997], alkaline basalt, basanite and nephelinite of the Rhine graben (Central Europe) [Jung, Hoernes, 2000], Panjal traps (NW India) [Shellnutt, Rehman, Manu Prasanth, 2021], median of mantle values [Rollinson, 1993], and the range of magmatic and meteoric waters [Rollinson, 1993; Pokrovsky, 2000] are shown. Data for alkaline and subalkaline igneous rocks on the Kuznetsk Alatau, Russian Altai, Southeastern Tuva, Western Transbaikalia and Southern Tien-Shan are given by [Pokrovsky et al., 1998; Doroshkevich et al., 2012; Vrublevskii et al., 2012, 2018, 2020; Vrublevskii, Kotel'nikov, Izokh, 2018; Vrublevskii, Gertner, 2021]

Обсуждение результатов и выводы

Наряду с геодинамической обстановкой и составом источников базальтового магматизма, важное значение в его геохимической эволюции имеют масштабы дифференциации мафитовых сублитосферных расплавов и характер их взаимодействия с разнородным субстратом самой литосферы. По разным оценкам, область значений $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ для мантийных производных ограничивается узким интервалом от +5,5 до +5,9 ‰ [Harmon, Hoefs, 1995; Eiler et al., 1997, 2000; Покровский, 2000; Troch et al., 2020]. Сходным составом ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ от +5 до +5,4 ‰) обладает оливин в ксенолитах верхнемантийных перидотитов и в базальтах срединно-океанических хребтов [Mattey, Lowry, Macpherson, 1994; Eiler et al., 1997]. При этом считается, что более значительные отклонения относительно $\delta^{18}\text{O}$ -медианы в расплавах и изверженных породах могут быть обусловлены либо природой магматического источника и процессами фракционирования изотопов кислорода, либо влиянием коровой контаминации, субдукционных флюидов и атмосферных вод.

Магматические источники базальтоидов.

Особенности изотопного состава кислорода в изученных базанитах свидетельствуют о мантийном происхождении их первичного расплава. Большая часть значений $\delta^{18}\text{O}$ в породах с $\# \text{Mg} \approx 45\text{--}63$ находится в MORB- и OIB-диапазоне и согласуется с трендом $\delta^{18}\text{O}\text{--SiO}_2$ в дифференцированных вулканических сериях (см. рис. 3, *a, b*; таблица). При этом вещество наименее обогащенных ^{18}O базанитов ($\delta^{18}\text{O} +5,7$ ‰, $n = 6$) из диатрем Марская, Высота 465, Конгаровская и Три брата фактически сопоставимо с хондритовым эталоном (рис. 3, *c*). Составы неизмененных долеритов с $\# \text{Mg} > 45$ и $\delta^{18}\text{O}$ от +6,5 до +7,6 ‰ тоже не выходят за пределы интервала значений, характерных для внутриплитных океанических (OIB) и континентальных (CIB, CFB) базальтов (рис. 3, *a, b*; таблица). Это позволяет предполагать мантийный уровень генерации исходного расплава и присутствие плюмового вещества. Девонские базальты Минусинского палеорифта также связывают с деятельностью сублитосферного плюма [Vorontsov et al., 2021], однако эти породы обладают наиболее «тяжелым» ($\delta^{18}\text{O} +8,8$ ‰) изотопным составом, маскирующим $\delta^{18}\text{O}$ -метки магматического источника.

На основании изотопных Nd–Sr–Pb данных по разновозрастным вулcano-плутоническим комплексам Азии, Европы и Африки считается, что в процесс генерации базальтовой, в том числе щелочно-мафитовой магмы может быть вовлечено вещество умеренно деплетированной (PREMA = prevalent

mantle или HIMU = high μ) и обогащенной (EM = enriched mantle) мантии [Furman, 1995; Jung, Hoernes, 2000; Bogaard, Wörner, 2003; Trumbull et al., 2003; Song et al., 2008; Zhang, Liu, Guo, 2010; Jung et al., 2012; Врублевский и др., 2012; Doroshkevich et al., 2012; Castillo, Hilton, Halldórsson, 2014; Shellnutt, 2014; Yarmolyuk et al., 2015; Vrublevskii et al., 2019, 2020, 2021; Ярмолук и др., 2020; Врублевский, Гертнер, 2021; Vorontsov et al., 2021]. Допускается его смешение, а также непосредственная экстракция расплавов из модифицированной литосферной мантии. Как правило, формирование ассоциаций магматических пород с подобным изотопным составом связывают с деятельностью мантийного плюма (горячей точки OIB-типа).

Особенности распределения HFS (high field strength)-элементов в базанитах и долеритах Минусинского прогиба свидетельствуют о геохимическом сходстве их первичных расплавов с производными OIB-магматизма (см. рис. 2, *b–d*). Напротив, составы девонских субщелочных базальтов Копьевского поднятия заметно отличаются от (MORB–OIB)-последовательности мантийных магм и в сочетании с отрицательной Nb–Ta-аномалией мультиэлементных спектров наиболее соответствуют базальтам островных дуг. Гетерогенность протолитов отчетливо прослеживается по изменению Zr/Nb в среднем от ~ 15 в субщелочных базальтах до $\sim 2,1\text{--}5,6$ в базанитах и долеритах (рис. 2, *d*). Для геологического развития Минусинского прогиба такая вариативность состава базальтоидов может отражать смену источника первичной магмы. Предположительно, ранне-девонские вулканы подобно траппам Кузнецкого и Тунгусского бассейнов являются производными гидратированной мантии, вещество которой обычно участвует в формировании островодужных базальтов (рис. 2, *b*). В составе долеритов и базанитов мезозоя доминирует уже материал обогащенной мантии [Врублевский и др., 2022]. Например, сходную неоднородность источников магм показывают сопутствующие тефриты и толеиты Эмейшаньской изверженной провинции, сформированной под влиянием сублитосферного плюма в поздней перми [Song et al., 2008].

Роль коровой контаминации и флюидов при формировании базальтоидов.

Более высокие, по сравнению с мантийными, значения $\delta^{18}\text{O}$ (> 6 ‰) в базанитах, долеритах и субщелочных базальтах могут указывать на контаминацию мантийного расплава веществом верхней коры. Ее разную степень демонстрируют щелочные базальты Рейнского грабена в Центральной Европе, траппы Панджала (СЗ Индия), некоторые щелочно-мафитовые интрузии Алтае-Саянской складчатой области (рис. 3, *c*). Как и в

Минусинском прогибе, значительная часть составов изверженных пород находится в равновесии с «нормально-магматической» водой, содержащейся в расплаве/свежих стеклах MORB [Покровский, 2000]. В отличие от ювенильной воды, никогда не имевшей контакта с гидросферой, ее происхождение связывают с частичной дегидратацией осадочного материала, попадающего в мантию в зонах субдукции. Такой трактовке не противоречит аккреционно-коллизийная модель каледонид ЦАСП.

Похожий «изотопно-кислородный» сдвиг наблюдается при взаимодействии «водный флюид – порода» на заключительных стадиях эруптивного процесса [Demeny et al., 1998]. Однако в составе некоторых долеритовых даек фиксируются признаки смешения низкотемпературных гидротерм и нагретых метеорных вод с $\delta^{18}\text{O} < 0$ ‰, которое приводит к изотопной инверсии с понижением значений $\delta^{18}\text{O}$ в породах от +4 до –0,7 ‰. При формировании базанитовых диатрем подобные изменения могли быть более локальными и проявиться в меньшей степени.

Особенности генерации базальтовых магм. По геохимическим данным в образовании базальтоидов Минусинского прогиба в различной степени принимало участие мантийное вещество. Однако только извержения долеритов можно соотнести по времени с активностью Сибирского плюма на рубеже перми и триаса. По-видимому, его влиянием обусловлено

плавление и смешение вещества глубинных протолитов при генерации первичной магмы. Относительное обогащение HFS- и LIL-элементами наиболее поздних базанитов при высоком содержании MgO , Cr , Ni в них не согласуется с ординарным уменьшением степени плавления мантийного перидотита. В подобных случаях аномальное накопление редких рассеянных элементов часто связывают с вовлечением в магму материала амфиболовых или флогопитовых жил из перидотитов модифицированной субконтинентальной литосферной мантии [Hunt et al., 2012; Jung et al., 2012]. Возможно, позднемеловые базанитовые эксплозии в Минусинском палеорифте были вызваны процессом декомпрессионного плавления литосферной мантии, метасоматизированной в период активности Сибирского плюма [Malkovets et al., 2003; Врублевский и др., 2022].

На основании полученных данных можно предполагать, что развитие разновозрастного базальтового вулканизма в Минусинском прогибе происходило при участии sublitosферных плюмов, которые модифицировали субстраты литосферной мантии и нижнекоровых протолитов в режиме горячей точки OIB-типа. Смешение разнотемпературного вещества способствовало образованию магм гибридной природы. Базальтовые извержения сопровождались коровой контаминацией расплавов и их взаимодействием с низкотемпературными гидротермами и метеорными водами.

Список источников

- Воронцов А.А., Федосеев Г.С., Андрищенко С.В. Девонский вулканизм Минусинского прогиба Алтае-Саянской области: геологические, геохимические и изотопные Sr–Nd характеристики пород // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 9. С. 1283–1313.
- 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.
- Врублевский В.В., Котельников А.Д., Изох А.Э. Возраст, петрологические и геохимические условия формирования когташского габбро-монцонитового комплекса Кузнецкого Алатау // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 7. С. 900–930.
- Врублевский В.В., Котельников А.Д., Тишин П.А., Изох А.Э., Казенова Ф., Кремер И.О. Геохимические признаки разнотемпературной генерации магм пермско-триасовых долеритов и позднемеловых базанитов Минусинского палеорифта, Сибирь // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 506, № 2. С. 158–162.
- Врублевский В.В., Крупчатников В.И., Изох А.Э., Гертнер И.Ф. Щелочные породы и карбонатиты Горного Алтая (комплекс эдельвейс): индикатор раннепалеозойского плюмового магматизма в Центрально-Азиатском складчатом поясе // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 8. С. 945–963.
- Крюков А.В. О новом типе трубок взрыва в юго-западном обрамлении Сибирской платформы // Геология юго-западного обрамления Сибирской платформы. М.: Недра, 1964. С. 196–240.
- Медведев А.Я., Горнова М.А., Дриль С.И., Каримов А.А., Беляев В.А., Иванов А.В., Демонтерова Е.И. Минералогия, геохимия и Sr–Nd–Pb изотопная систематика позднекайнозойских базанитов Бороздинского гольца (хребет Хэнтэй, Южное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2020. Т. 61, № 8. С. 1031–1054.
- Покровский Б.Г. Коревая контаминация мантийных магм по данным изотопной геохимии. М.: Наука, 2000. 228 с.
- Покровский Б.Г., Андреева Е.Д., Врублевский В.В., Гринев О.М. Природа контаминации щелочно-габброидных интрузий южного обрамления Сибирской платформы по данным изотопии стронция и кислорода // Петрология. 1998. Т. 6, № 3. С. 259–273.
- Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Саватенков В.М., Кудряшова Е.А., Кузнецов М.В. Позднемезозойская Восточно-Монгольская вулканическая область: строение, магматические ассоциации, источники магматизма // Петрология. 2020. Т. 28, № 6. С. 563–590.
- Bogaard P.J.F., Wörner G. Petrogenesis of basanitic to tholeiitic volcanic rocks from the Miocene Vogelsberg, Central Germany // Journal of Petrology. 2003. V. 44. P. 569–602.

- Callegaro S., Svensen H.H., Neumann E.R., Polozov A.G., Jerram D.A., Deegan F.M., Planke S., Shiganova O.V., Ivanova N.A., Melnikov N.V.** Geochemistry of deep Tunguska Basin sills, Siberian Traps: correlations and potential implications for the end-Permian environmental crisis // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2021. V. 176. Article 49.
- Castillo P.R., Hilton D.R., Halldórsson S.A.** Trace element and Sr–Nd–Pb isotope geochemistry of Rungwe volcanic province, Tanzania: implications for a superplume source for East Africa rift magmatism // *Frontiers in Earth Science / Petrology*. 2014. V. 2. Article 21.
- Condie K.C., Shearer Ch.K.** Tracking the evolution of mantle sources with incompatible element ratios in stagnant-lid and plate-tectonic planets // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2017. V. 213. P. 47–62.
- Deines P.** Stable isotope variations in carbonatites // *Carbonatites. Genesis and Evolution*. London Unwyn Hyman, 1989. P. 301–359.
- Démeny A., Ahijado A., Casillas R., Vennemann T.W.** Crustal contamination and fluid/rock interaction in the carbonatites of Fuerteventura (Canary Islands, Spain): A C, O, H isotope study // *Lithos*. 1998. V. 44. P. 101–115.
- 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.
- Eiler J.M., Farley K.A., Valley J.W., Hauri E., Craig H., Hart S.R., Stolper E.M.** Oxygen isotope variations in ocean island basalt phenocrysts // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1997. V. 61. P. 2281–2293.
- Eiler J.M., Grawford A., Elliott T., Farley K.A., Valley J.W., Stolper E.M.** Oxygen isotope geochemistry of oceanic-arc lavas // *Journal of Petrology*. 2000. V. 41. P. 229–256.
- Eiler J.M.** Oxygen Isotope Variations of Basaltic Lavas and Upper Mantle Rocks // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2001. V. 43 (1). P. 319–364.
- Ernst R.E.** Large Igneous Provinces. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 630 p.
- Furman T.** Melting of metasomatized subcontinental lithosphere: undersaturated mafic lavas from Rungwe, Tanzania // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1995. V. 122. P. 97–115.
- Hunt A.C., Parkinson I.J., Harris N.B.W., Barry T.L., Rogers N.W., Yondon M.** Cenozoic volcanism on the Hangai Dome, Central Mongolia: geochemical evidence for changing melt sources and implications for mechanisms of melting // *Journal of Petrology*. 2012. V. 53. P. 1913–1942.
- Harmon R.S., Hoefs J.** Oxygen isotope heterogeneity of the mantle deduced from global ^{18}O systematics of basalts from different geotectonic settings // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1995. V. 120. P. 95–114.
- Jung S., Hoernes S.** The major- and trace-element and isotope (Sr, Nd, O) geochemistry of Cenozoic alkaline rift-type volcanic rocks from the Rhön area (central Germany): petrology, mantle source characteristics and implications for asthenosphere–lithosphere interactions // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2000. V. 99. P. 27–53.
- Jung S., Vieten K., Romer R.L., Mezger K., Hoernes S., Satir M.** Petrogenesis of Tertiary Alkaline Magmas in the Siebengebirge, Germany // *Journal of Petrology*. 2012. V. 53. P. 2381–2409.
- Ito E., White W.M., Gopel E.** The O, Sr and Pb isotope geochemistry of MORB // *Chemical Geology*. 1987. V. 62. P. 157–176.
- Kelemen P.B., Hanghøj K., Greene A.R.** One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust // *Treatise on Geochemistry* (Eds. Y.D. Holland, K.K. Turekian). Elsevier Ltd., 2003. V. 3. P. 593–659.
- Malkovets V.G., Litasov Yu.D., Travin A.V., Litasov K.D., Taylor L.A.** Volcanic pipes as clues to upper mantle petrogenesis: Mesozoic Ar–Ar dating of the Minusinsk basalts, South Siberia // *International Geology Review*. 2003. V. 45. P. 133–142.
- Mattey D., Lowry D., Macpherson C.** Oxygen isotope composition of mantle peridotite // *Earth Planetary Science Letters*. 1994. V. 128. P. 231–241.
- Pearce J.A.** Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust // *Lithos*. 2008. V. 100. P. 14–48.
- Rollinson H.R.** Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. London : Longman Group UK Limited, 1993. 352 p.
- Sharp Z.D.** A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1990. V. 54. P. 1353–1357.
- Shellnutt J.G.** The Emeishan large igneous province: A synthesis // *Geoscience Frontiers*. 2014. V. 5. P. 369–394.
- Shellnutt J.G., Rehman H.U., Manu Prasanth M.P.** Insight into crustal contamination and hydrothermal alteration of the Panjal Traps (Kashmir) from O-isotopes // *International Geology Review*. 2021. V. 64, No. 11. P. 1556–1573.
- Song X.-Y., Qi H.-W., Robinson P.T., Zhou M.-F., Cao Z.-M., Chen L.-M.** Melting of the subcontinental lithospheric mantle by the Emeishan mantle plume; evidence from the basal alkaline basalts in Dongchuan, Yunnan, Southwestern China // *Lithos*. 2008. V. 100. P. 93–111.
- Sun S., McDonough W.F.** Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the ocean basins* (Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry). Geological Society Special Publication. 1989. V. 42. P. 313–345.
- Svetlitskaya T.V., Nevolko P.A.** Late Permian–Early Triassic traps of the Kuznetsk Basin, Russia: Geochemistry and petrogenesis in respect to an extension of the Siberian Large Igneous Province // *Gondwana Research*. 2016. V. 39. P. 57–76.
- Taylor H.P.** The oxygen isotope geochemistry of igneous rocks // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1968. V. 19 (1). P. 1–71.
- Taylor H.P. Jr., Sheppard S.M.F.** Igneous rocks: I. Processes of isotopic fractionation and isotope systematics // *Reviews in Mineralogy*. 1986. V. 16. P. 227–271.
- Troch J., Ellis B.S., Harris C., Bachmann O., Bindeman I.N.** Low- $\delta^{18}\text{O}$ silicic magmas on Earth: A review // *Earth-Science Reviews*. 2020. V. 208. Article 103299.
- Trumbull R.B., Bühn B., Romer R.L., Volker F.** The petrology of basanite-tephrite intrusions in the Erongo complex and implications for a plume origin of Cretaceous alkaline complexes in Namibia // *Journal of Petrology*. 2003. V. 44. P. 93–111.
- Vorontsov A., Yarmolyuk V., Dril S., Ernst R., Perfilova O., Grinev O., Komaritsyna T.** Magmatism of the Devonian Altai-Sayan rift system: Geological and geochemical evidence for diverse plume-lithosphere interactions // *Gondwana Research*. 2021. V. 89. P. 193–219.

Vrublevskii V.V., Morova A.A., Bukharova O.V., Konovalenko S.I. Mineralogy and geochemistry of Triassic carbonatites in the Matcha alkaline intrusive complex (Turkestan-Alai Ridge, Kyrgyz Southern Tien Shan), SW Central Asian Orogenic Belt // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. V. 153. P. 252–281.

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. Article 170.

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. Article 104163.

Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Gutiérrez-Alonso G., Hofmann M., Grinev O.M., Mustafaev A. Multiple intrusion stages and mantle sources of the Paleozoic Kuznetsk Alatau alkaline province, Southern Siberia: geochemistry and Permian U–Pb, Sm–Nd ages in the Goryachegorsk ijolite-foyaite intrusion // *International Geology Review*. 2021. V. 63, No. 18. P. 2215–2231.

Weaver B.L. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints // *Earth and Planetary Science Letters*. 1991. V. 104. P. 381–397.

Yarmolyuk V.V., Kudryashova E.A., Kozlovsky A.M., Lebedev V.A., Savatenkov V.M. Late Mesozoic–Cenozoic intraplate magmatism in Central Asia and its relation with mantle diapirism: Evidence from the South Khangai volcanic region, Mongolia // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015. V. 111. P. 604–623.

Zhang Y., Liu J., Guo Z. Permian basaltic rocks in the Tarim basin, NW China: Implications for plume–lithosphere interaction // *Gondwana Research*. 2010. V. 18. P. 596–610.

References

Vorontsov A.A., Fedoseev G.S., Andryushchenko S.V. Devonian volcanism in the Minusa Basin in the Altai-Sayan area: geological, geochemical, and Sr–Nd isotopic characteristics of rocks // *Russian Geology and Geophysics*. 2013. V. 54, No. 9. pp. 1283–1313. In Russian

Vrublevskii V.V., Gertner I.F. Paleozoic alkaline–mafic intrusions of the Kuznetsk Alatau, their sources, and conditions for magma generation // *Petrology*. 2021. V. 29. No. 1. pp. 31–63. In Russian

Vrublevskii V.V., Kotelnikov A.D., Izokh A.E. The age and petrologic and geochemical conditions of formation of the Kogtakh gabbro–monzonite complex in the Kuznetsk Alatau // *Russian Geology and Geophysics*. 2018. V. 59, No. 7. pp. 900–930. In Russian

Vrublevskii V.V., Kotelnikov A.D., Tishin P.A., Izokh A.E., Kazenova F., Kremer I.O. Geochemical signs of different deep-level magma generation for Permian–Triassic dolerites and Late Cretaceous basanites of the Minusa paleorift, Siberia // *Doklady of Earth Sciences*. 2022. V. 506, No. 2. pp. 158–162. In Russian

Vrublevskii V.V., Krupchatnikov V.I., Izokh A.E., Gertner I.F. The alkaline and carbonatitic rocks of Gornyy Altai (Edel’veis complex) as indicators of Early Paleozoic plume magmatism in the Central Asian Fold Belt // *Russian Geology and Geophysics*. 2012. V. 53, No. 8. pp. 945–963. In Russian

Kryukov A.V. *O novom tipe trubok vzryva v yugo-zapadnom obramlenii Sibirskoy platformy* [A new type of volcanic pipe on the southwest margin of the Siberian platform] // *Geology of the Siberian platform southwest margin* (Ed. M.I. Volobuev). Moscow: Nedra Press, 1964. pp. 196–240. In Russian

Medvedev A.Ya., Gornova M.A., Dril’ S.I., Karimov A.A., Belyaev V.A., Ivanov A.V., Demonterova E.I. Mineralogy, geochemistry, and Sr–Nd–Pb isotope systematics of Late Cenozoic basanites of the Borozdin bald mountain (Khentei Ridge, southern Transbaikalia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2020. V. 61, No. 8. pp. 1031–1054. In Russian

Pokrovsky B.G. *Korovaya kontaminatsiya mantiynykh magm po dannym izotopnoy geokhimii* [Crustal Contamination of mantle magmas: evidence from isotope geochemical data]. Moscow: Nauka, 2000. 228 p. In Russian

Pokrovsky B.G., Andreeva E.D., Vrublevskii V.V., Grinev O.M. Contamination mechanisms of alkaline gabbroid intrusions in the southern framing of the Siberian platform: evidence from strontium and oxygen isotopic compositions // *Petrology*. 1998. V. 6, No. 3. pp. 259–273. In Russian

Yarmolyuk V.V., Kozlovsky A.M., Savatenkov V.M., Kudryashova E.A., Kuznetsov M.V. Late Mesozoic Eastern Mongolia volcanic area: structure, magmatic associations, and sources of melts // *Petrology*. 2020. V. 28, No. 6. pp. 563–590. In Russian

Bogaard P.J.F., Wörner G. Petrogenesis of basanitic to tholeiitic volcanic rocks from the Miocene Vogelsberg, Central Germany // *Journal of Petrology*. 2003. V. 44. pp. 569–602.

Callegaro S., Svensen H.H., Neumann E.R., Polozov A.G., Jerram D.A., Deegan F.M., Planke S., Shiganova O.V., Ivanova N.A., Melnikov N.V. Geochemistry of deep Tunguska Basin sills, Siberian Traps: correlations and potential implications for the end-Permian environmental crisis // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2021. V. 176. Article 49.

Castillo P.R., Hilton D.R., Halldórsson S.A. Trace element and Sr–Nd–Pb isotope geochemistry of Rungwe volcanic province, Tanzania: implications for a superplume source for East Africa rift magmatism // *Frontiers in Earth Science / Petrology*. 2014. V. 2. Article 21.

Condie K.C., Shearer Ch.K. Tracking the evolution of mantle sources with incompatible element ratios in stagnant-lid and plate-tectonic planets // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2017. V. 213. pp. 47–62.

Deines P. Stable isotope variations in carbonatites // In: *Carbonatites. Genesis and Evolution*. London: Unwyn Hyman, 1989. pp. 301–359.

Démény A., Ahijado A., Casillas R., Vennemann T.W. Crustal contamination and fluid/rock interaction in the carbonatites of Fuerteventura (Canary Islands, Spain): A C, O, H isotope study // *Lithos*. 1998. V. 44. pp. 101–115.

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. pp. 157–172.

Eiler J.M. Oxygen Isotope Variations of Basaltic Lavas and Upper Mantle Rocks // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2001. V. 43(1). pp. 319–364.

Eiler J.M., Farley K.A., Valley J.W., Hauri E., Craig H., Hart S.R., Stolper E.M. Oxygen isotope variations in ocean island basalt phenocrysts // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1997. V. 61. pp. 2281–2293.

- Eiler J.M., Grawford A., Elliott T., Farley K.A., Valley J.W., Stolper E.M. Oxygen isotope geochemistry of oceanic-arc lavas // *Journal of Petrology*. 2000. V. 41. pp. 229–256.
- Ernst R.E. Large Igneous Provinces. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 630 p.
- Furman T. Melting of metasomatized subcontinental lithosphere: undersaturated mafic lavas from Rungwe, Tanzania // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1995. V. 122. pp. 97–115.
- Harmon R.S., Hoefs J. Oxygen isotope heterogeneity of the mantle deduced from global ^{18}O systematics of basalts from different geotectonic settings // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1995. V. 120. pp. 95–114.
- Hunt A.C., Parkinson I.J., Harris N.B.W., Barry T.L., Rogers N.W., Yondon M. Cenozoic volcanism on the Hangai Dome, Central Mongolia: geochemical evidence for changing melt sources and implications for mechanisms of melting // *Journal of Petrology*. 2012. V. 53. pp. 1913–1942.
- Ito E., White W.M., Gopel E. The O, Sr and Pb isotope geochemistry of MORB // *Chemical Geology*. 1987. V. 62. pp. 157–176.
- Jung S., Hoernes S. The major- and trace-element and isotope (Sr, Nd, O) geochemistry of Cenozoic alkaline rift-type volcanic rocks from the Rhön area (central Germany): petrology, mantle source characteristics and implications for asthenosphere–lithosphere interactions // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2000. V. 99. pp. 27–53.
- Jung S., Vieten K., Romer R.L., Mezger K., Hoernes S., Satir M. Petrogenesis of Tertiary Alkaline Magmas in the Siebengebirge, Germany // *Journal of Petrology*. 2012. V. 53. pp. 2381–2409.
- Kelemen P.B., Hanghøj K., Greene A.R. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust // *Treatise on Geochemistry* (Eds. Y.D. Holland, K.K. Turekian). Elsevier Ltd., 2003. V. 3. pp. 593–659.
- Malkovets V.G., Litasov Yu.D., Travin A.V., Litasov K.D., Taylor L.A. Volcanic pipes as clues to upper mantle petrogenesis: Mesozoic Ar–Ar dating of the Minusinsk basalts, South Siberia // *International Geology Review*. 2003. V. 45. pp. 133–142.
- Mattey D., Lowry D., Macpherson C. Oxygen isotope composition of mantle peridotite // *Earth Planetary Science Letters*. 1994. V. 128. pp. 231–241.
- Pearce J.A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust // *Lithos*. 2008. V. 100. pp. 14–48.
- Rollinson H.R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation // London: Longman Group UK Limited, 1993. 352 p.
- Sharp Z.D. A laser-based microanalytical method for the in-situ determination of oxygen isotope ratios of silicates and oxides // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1990. V. 54. pp. 1353–1357.
- Shellnutt J.G. The Emeishan large igneous province: A synthesis // *Geoscience Frontiers*. 2014. V. 5. pp. 369–394.
- Shellnutt J.G., Rehman H.U., Manu Prasanth M.P. Insight into crustal contamination and hydrothermal alteration of the Panjal Traps (Kashmir) from O-isotopes // *International Geology Review*. 2021. V. 64. No. 11. pp. 1556–1573.
- Song X.-Y., Qi H.-W., Robinson P.T., Zhou M.-F., Cao Z.-M., Chen L.-M. Melting of the subcontinental lithospheric mantle by the Emeishan mantle plume; evidence from the basal alkaline basalts in Dongchuan, Yunnan, Southwestern China // *Lithos*. 2008. V. 100. pp. 93–111.
- Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the ocean basins* (Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry). Geological Society Special Publication. 1989. V. 42. pp. 313–345.
- Svetlitskaya T.V., Nevolko P.A. Late Permian–Early Triassic traps of the Kuznetsk Basin, Russia: Geochemistry and petrogenesis in respect to an extension of the Siberian Large Igneous Province // *Gondwana Research*. 2016. V. 39. pp. 57–76.
- Taylor H.P. Jr., Sheppard S.M.F. Igneous rocks: I. Processes of isotopic fractionation and isotope systematics // *Reviews in Mineralogy*. 1986. V. 16. pp. 227–271.
- Taylor H.P. The oxygen isotope geochemistry of igneous rocks // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1968. V. 19(1). pp. 1–71.
- Troch J., Ellis B.S., Harris C., Bachmann O., Bindeman I.N. Low- $\delta^{18}\text{O}$ silicic magmas on Earth: A review // *Earth-Science Reviews*. 2020. V. 208. Article 103299.
- Trumbull R.B., Bühn B., Romer R.L., Volker F. The petrology of basanite-tephrite intrusions in the Erongo complex and implications for a plume origin of Cretaceous alkaline complexes in Namibia // *Journal of Petrology*. 2003. V. 44. pp. 93–111.
- Vorontsov A., Yarmolyuk V., Dril S., Ernst R., Perfilova O., Grinev O., Komaritsyna T. Magmatism of the Devonian Altai-Sayan rift system: Geological and geochemical evidence for diverse plume-lithosphere interactions // *Gondwana Research*. 2021. V. 89. pp. 193–219.
- 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. Article 170.
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Gutiérrez-Alonso G., Hofmann M., Grinev O.M., Mustafaez A. Multiple intrusion stages and mantle sources of the Paleozoic Kuznetsk Alatau alkaline province, Southern Siberia: geochemistry and Permian U–Pb, Sm–Nd ages in the Goryachegorsk ijolite-foyaite intrusion // *International Geology Review*. 2021. V. 63. No. 18. pp. 2215–2231.
- Vrublevskii V.V., Morova A.A., Bukharova O.V., Konovalenko S.I. Mineralogy and geochemistry of Triassic carbonatites in the Matcha alkaline intrusive complex (Turkistan-Alai Ridge, Kyrgyz Southern Tien Shan), SW Central Asian Orogenic Belt // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018a. V. 153. pp. 252–281.
- 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. Article 104163.
- Weaver B.L. The origin of ocean island basalt end-member compositions: trace element and isotopic constraints // *Earth and Planetary Science Letters*. 1991. V. 104. pp. 381–397.
- Yarmolyuk V.V., Kudryashova E.A., Kozlovsky A.M., Lebedev V.A., Savatenkov V.M. Late Mesozoic–Cenozoic intraplate magmatism in Central Asia and its relation with mantle diapirism: Evidence from the South Khangai volcanic region, Mongolia // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015. V. 111. pp. 604–623.
- Zhang Y., Liu J., Guo Z. Permian basaltic rocks in the Tarim basin, NW China: Implications for plume–lithosphere interaction // *Gondwana Research*. 2010. V. 18. pp. 596–610.

Информация об авторах:

Врублевский В.В., доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой динамической геологии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: vasvr@yandex.ru

Котельников А.Д., заведующий лабораторией, НИЛ «Геокарт», геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: geokart@ggf.tsu.ru

Казенова Ф., младший научный сотрудник, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: feride.kazenova@mail.ru

Кремер И.О., директор ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем», геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: kremer.ivan.1992@mail.ru

Тишин П.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, декан, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: tishin_pa@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors:

Vrublevskii V.V., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Department of Dynamical Geology, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: vasvr@yandex.ru

Kotel'nikov A.D., Head of Laboratory of Geokart, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: geokart@ggf.tsu.ru

Kazenova F., Junior Researcher, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: feride.kazenova@mail.ru

Kremer I.O., Director, Analytical Center for Geochemistry of Natural Systems, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: kremer.ivan.1992@mail.ru

Tishin P.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Dean of the Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: tishin_pa@mail.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.08.2022; одобрена после рецензирования 15.09.2022; принята к публикации 06.11.2022

The article was submitted 10.08.2022; approved after reviewing 15.09.2022; accepted for publication 06.11.2022