

УДК 552.11:552.3:550.4(571.513)

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ РАЗНОГЛУБИННОЙ ГЕНЕРАЦИИ МАГМ ПЕРМСКО-ТРИАСОВЫХ ДОЛЕРИТОВ И ПОЗДНЕМЕЛОВЫХ БАЗАНИТОВ МИНУСИНСКОГО ПАЛЕОРИФТА, СИБИРЬ

© 2022 г. В. В. Врублевский<sup>1,\*</sup>, А. Д. Котельников<sup>1</sup>, П. А. Тишин<sup>1</sup>, А. Э. Изох<sup>2,1</sup>,  
Ф. Казенова<sup>1</sup>, И. О. Кремер<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН В.В. Ревердатто 28.04.2022 г.

Поступило 17.05.2022 г.

После доработки 14.06.2022 г.

Принято к публикации 17.06.2022 г.

Химический состав разновозрастных щелочных (базаниты, поздний мел) и субщелочных (долериты, пермь–триас) базальтоидов в северной части Минусинского прогиба изучен методами оптической эмиссионной спектроскопии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Выявленные отличия субвулканических пород по характеру обогащения HFS- и LIL-элементами могут свидетельствовать о генерации первичных магм на разной глубине и при небольших степенях плавления гранатовых и шпинелевых мантийных перидотитов. Для формирования базанитов применима модель декомпрессионного частичного плавления субконтинентальной литосферной мантии в условиях стабильности граната. Предполагается, что при возникновении долеритовой магмы происходило взаимодействие расплава из менее глубинного шпинелевого перидотита с “ОИВ-компонентом” сублитосферного мантийного плюма.

*Ключевые слова:* базальтовый магматизм, базанит, долерит, геохимия, частичное плавление, субконтинентальная литосферная мантия, мантийный плюм, Минусинский палеорифт

DOI: 10.31857/S2686739722600734

В современных геологических моделях развитие внутриплитного базальтового магматизма связывают с деятельностью мантийных плюмов [1]. Их активность приводит к процессам рифтинга литосферы и формированию крупных изверженных провинций с широким участием базитов различной щелочности. При этом в составе дифференцированных вулканических серий вместе с обычно доминирующими базальтами также выделяются нефелиниты, базаниты и тефриты [2–7]. В рифтогенных зонах щелочные породы локализованы в виде автономных ареалов с фрагментами лавовых полей, скоплений трубок взрыва, некков, даек и отдельных мелких штоков.

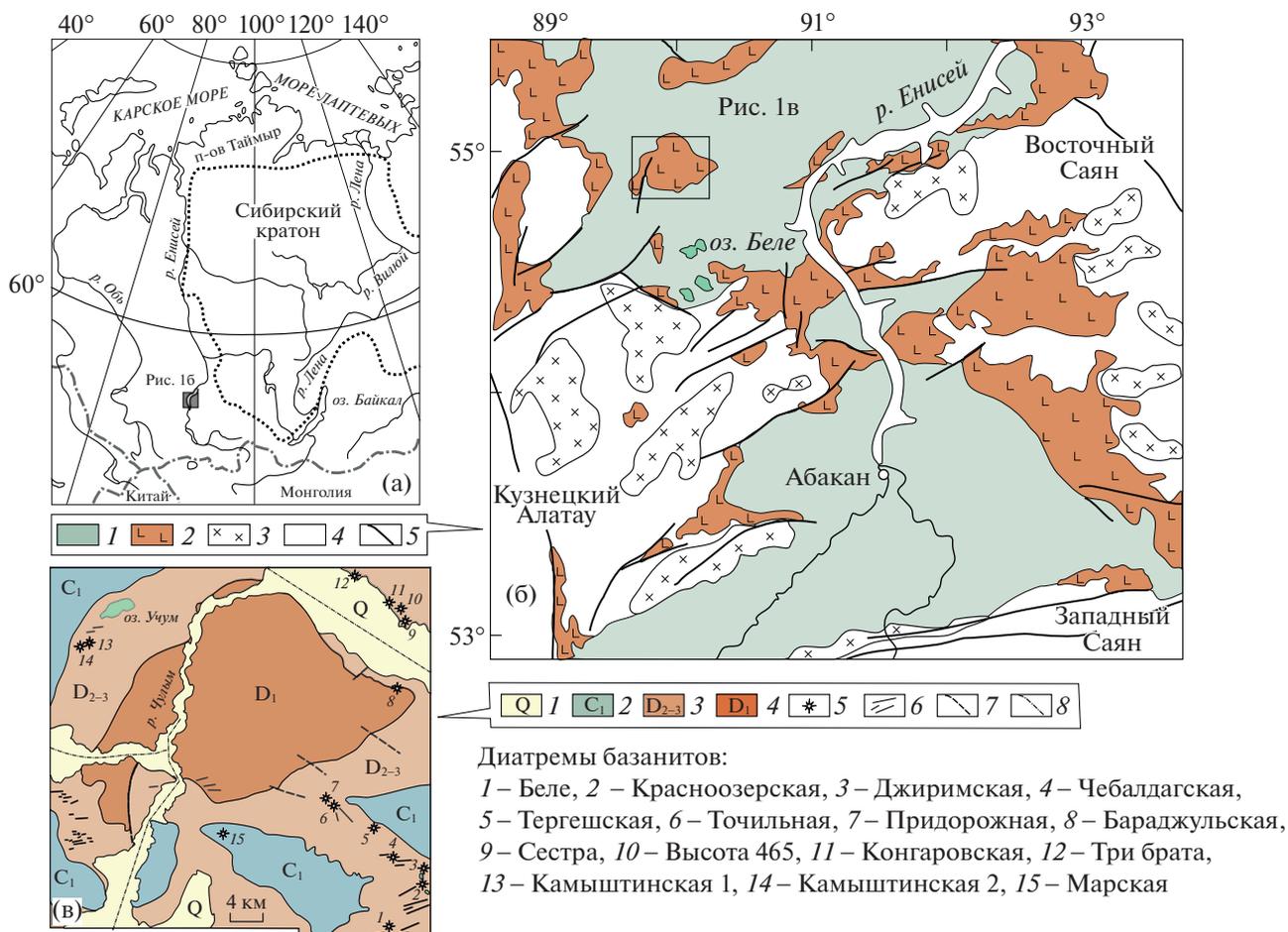
В некоторых магматических провинциях Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) наблюдается “телескопирование” разновозрастных проявлений внутриплитного базальтового

магматизма [6, 7]. В Алтае-Саянском регионе его продукты распространены на территории Минусинского прогиба, разделяющего горные сооружения Кузнецкого Алатау, Восточного и Западного Саяна. Здесь преобладают раннедевонские вулканы, характерные для формирующейся рифтовой области [7]. В северной части прогиба они образуют Копьевское купольное поднятие (рис. 1). Окружающие его терригенно-карбонатные отложения девона и раннего карбона прорваны дайками и мелкими штоками долеритов, предположительно пермско-триасового возраста (250–260 млн лет, Ar-Ar [8]; материалы ГДП-200), а также позднемеловыми (70–80 млн лет, Ar-Ar [8]) базанитовыми диатремами небольшого размера. Эруптивные трубки сосредоточены в виде трех ареалов на площади около 200 км<sup>2</sup>. Очевидно, что по объемам извержений базальтовый магматизм в поздней перми–раннем триасе и в поздне-мезозое значительно уступает своим девонским рифтогенным производным. Развитие подобного глубинного магматизма в виде небольших по размерам ареалов обычно наблюдается на периферии области влияния Сибирского мантийного плюма [9].

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

<sup>2</sup> Институт геологии и минералогии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

\*E-mail: vasvr@yandex.ru

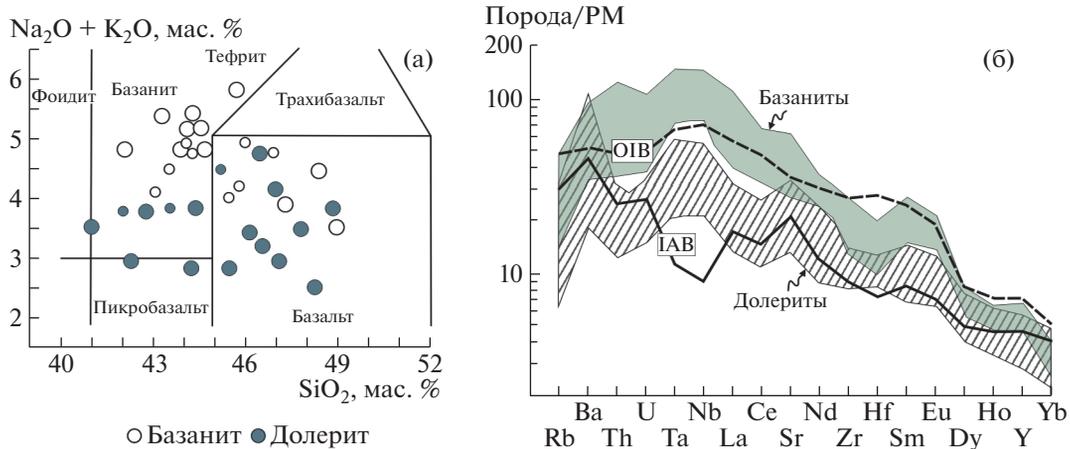


**Рис. 1.** Схемы расположения и геологического строения Минусинского прогиба. (а): географическая локализация (прямоугольный контур); (б): геологическая схема Минусинского прогиба [7]. 1 – осадочные отложения среднего девона–раннего карбона, 2 – раннедевонские вулканиты, 3 – интрузивные комплексы кембрия–ордовика, 4 – каледонские и более древние складчатые структуры, 5 – разломы; (в): схема строения 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 – вулканиты раннего девона, 5 – диатремы базанитов (вне масштаба), 6 – дайки долеритов (вне масштаба), 7 – дизъюнктивные нарушения, 8 – предполагаемые тектонические нарушения.

До настоящего времени данные по составу рассеянных химических элементов в базанитах и долеритах Минусинского прогиба ограничивались единичными прецизионными анализами [8, 10]. На основании более представительной выборки образцов нами выявлены геохимические различия в составе этих пород, указывающие на вероятные источники и условия генерации первичных расплавов в развитии регионального мафитового магматизма.

Обе разновидности базальтоидов содержат микропорфировые выделения оливина и титанистого клинопироксена, погруженные в основную массу с интерсеральной или интергранулярной структурой. Для долеритов также характерны вкрапленники основного плагиоклаза, а в базанитах отмечаются мегакристы клинопироксена и ксенолиты гранатовых и шпинелевых перидоти-

тов [8]. Изученные породы характеризуются повышенным содержанием  $TiO_2$  (2–3.5 мас. %), переменной кремнекислотностью ( $SiO_2$  41–49 мас. %) и щелочностью ( $Na_2O+K_2O$  3.5–5.8 и 2.4–4.5 мас. %;  $Na_2O/K_2O$  1.5–5 и 3–8 в базанитах и долеритах соответственно) (рис. 2 а). Долериты содержат больше  $CaO$  (9–13 мас. %) и меньше  $MgO$  (5–8 мас. %), чем базаниты ( $CaO$  8–10 мас. %,  $MgO$  7–11 мас. %). В более магнезиальных породах концентрации совместимых микроэлементов возрастают (в г/т,  $Sr$  100–400,  $Ni$  90–260,  $V$  150–380). Базаниты и долериты заметно различаются между собой по уровню накопления HFSE (в г/т,  $Nb$  72–116 и 16–40,  $Zr$  138–247 и 90–160,  $Th$  6.5–9.4 и 1–3,  $U$  1.4–2.2 и 0.3–0.7, REE 200–296 и 60–125) и LILE (в г/т,  $Rb$  15–26 и 4–20,  $Ba$  455–648 и 150–350,  $Sr$  920–1350 и 300–670). Спектры рас-



**Рис. 2.** Петрохимическая TAS-систематика (а) и распределение редких рассеянных элементов (б) в базанитах и долеритах Копьевского поднятия. Условные значки меньшего размера – составы по литературным данным. РМ = примитивная мантия [11], средние составы базальтов океанических островов (ОИВ) [11] и островных дуг (IAB) [12]. Анализы выполнены методами ICP-OES и ICP-MS на оборудовании ТРЦКП ТГУ (грант Министерства науки и высшего образования РФ 075-15-2021-693 № 13.ЦКП.21.0012)”.

пределения микроэлементов в породах имеют сходную конфигурацию и отчетливый Nb–Ta-максимум, который обычно отмечается для продуктов ОИВ-магматизма. Отличия состава долеритов относительно параметров эталонных источников базальтовых магм могут отражать дополнительное участие в петрогенезисе вещества, подобного IAB и E–MORB (рис. 2 б, 3 а).

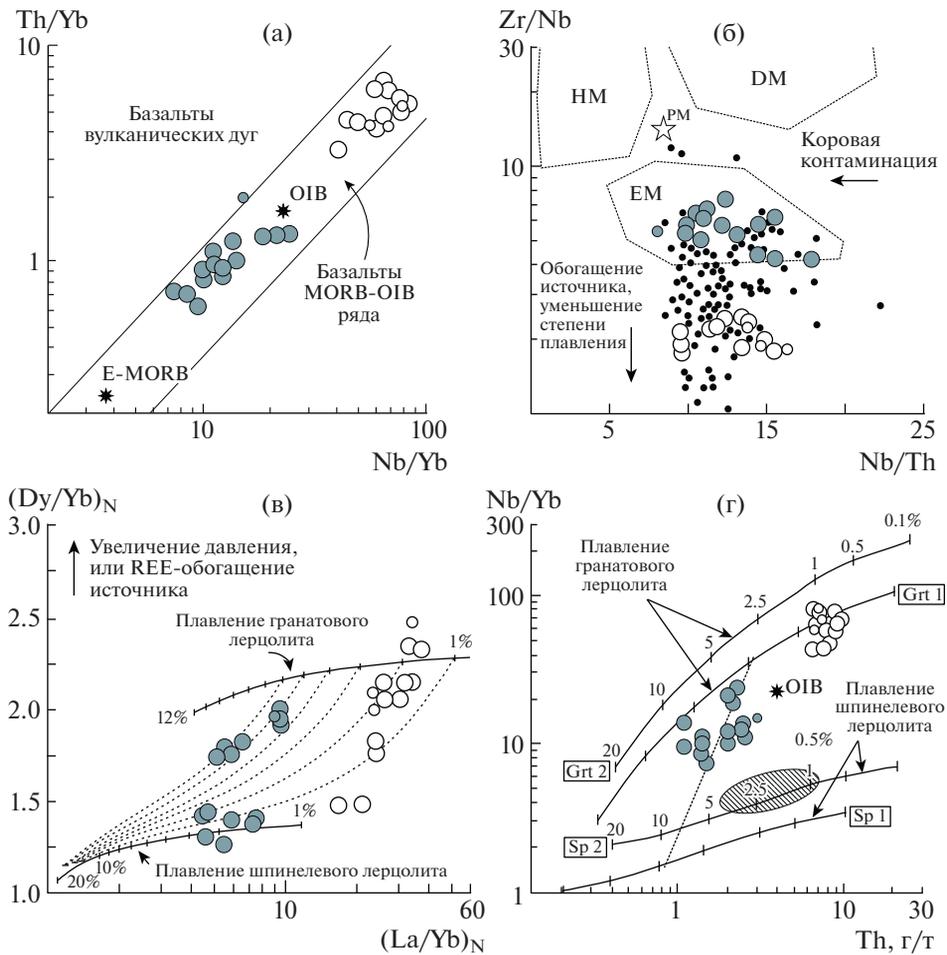
Вариации отношения Zr/Nb от 1.8–2.4 в базанитах (среднее 2.1;  $n = 11$ ) до 4–7.7 в долеритах (среднее 5.6;  $n = 15$ ) свидетельствуют о магмогенерации в мантии с разным уровнем обогащения HFSE (рис. 3 б). По этому показателю изученные породы аналогичны меловыми и кайнозойскими плюмовыми щелочными базальтоидами Монголии, Забайкалья, Центральной Европы, Восточной и Южной Африки [2–7, 15] и сопоставимы с производными ОИВ-вулканизма как HIMU, так и EM типа (Zr/Nb 2.7–5.5 и 3.5–8.4 соответственно) [16].

Базаниты имеют более высокие значения  $La_N/Yb_N$  (17–37), чем долериты (5–10) при сходных в среднем концентрациях Yb 1.7–2 г/т, а также относительно широкий диапазон фракционирования тяжелых редких земель ( $Du_N/Yb_N$  1.8–2.5, исключая два значения 1,5). Согласно модели [5], образование щелочной магмы могло происходить в результате декомпрессионного частичного (1–2%) плавления мантийного лерцолита в области фазового перехода гранат–шпинель (рис. 3 в). Ксенолиты подобных перидотитов наблюдаются в некоторых диатремах вблизи Копьевского поднятия [8]. Для долеритов отмечается дискретность значений  $Du_N/Yb_N$  (1.3–1.4 и 1.8–2; рис. 3 в), которая вероятна при смешении вещества из различных мантийных источников. Предполагается, что в данном случае частичное (2–4%) плавление менее глубинного лерцо-

лита шпинелевой фации и некоторое обогащение базальтовой магмы компонентом ОИВ-типа были вызваны тепловым и химическим воздействием сублитосферного мантийного плюма. По соотношениям REE его вещество могло иметь сходство с экспериментальными выплавками (4–6%) из гранатового перидотита (рис. 3 в).

Участие магм разного уровня глубинности и обогащения HFSE в базальтоидных извержениях Минусинского прогиба согласуется с моделью изобарного плавления лерцолита, основанной на соотношении Nb/Yb и Th в вулканических производных [17]. Базаниты сопоставимы с парциальными (0.5–1%) выплавками из лерцолита гранатовой фации, который рассматривается как умеренно обогащенный гипотетический источник в сублитосферной мантии (рис. 3 г). Составы долеритов распределяются преимущественно вдоль линии смешения вещества из разноглубинных перидотитовых субстратов гранатовой и шпинелевой фаций при степени их частичного (2.5 и 5%) плавления соответственно. В отличие от изученных вулкаников первичная магма более ранних девонских базальтов Копьевского поднятия могла поступать из сравнительно неглубокого очага с низкой степенью (1–5%) плавления шпинелевого лерцолита (рис. 3 г).

По геохимическим признакам изученные базальтоиды Минусинского прогиба имеют мантийную природу, однако только образование долеритов можно связать с главной фазой активности Сибирского плюма на рубеже перми и триаса [9]. Вероятно, его участием обусловлены режим плавления и смешения вещества разноглубинных источников в процессе генерации первичной магмы. Предполагается, что при формировании долеритов мантийный расплав частично взаимодействовал с материалом раннепалеозойских ак-



**Рис. 3.** Соотношение HFS-элементов в базанитах и долеритах Копьевского поднятия. (а): Th/Yb–Nb/Yb [13], E–MORB = средний состав обогащенных базальтов срединно-океанических хребтов; (б): Zr/Nb–Nb/Th [14], указаны источники магм в гидратированной (HM), деплетированной (DM) и обогащенной (EM) мантии. Черные точки – составы плюмовых щелочных базальтов и базанитов Монголии, Западного и Южного Забайкалья, Центральной Европы, Восточной и Южной Африки [2–7, 15]; (в): (Dy/Yb)<sub>N</sub>–(La/Yb)<sub>N</sub> [5], нормализация по хондриту [11], пунктирные линии – кривые декомпрессионного плавления мантийных перidotитов в области перехода от гранатовой к шпинелевой фази; (г): Nb/Yb–Th [17] с кривыми плавления умеренно и сильно обогащенных редкими элементами гранатовых (Grt1 и Grt2) и шпинелевых (Sp1 и Sp2) лерцолитов. Заштриховано поле составов девонских базальтов Копьевского поднятия [7], пунктир – линия смешения расплавов из разных источников. На модельных кривых для перidotитов (диаграммы “в” и “г”) отмечена степень частичного плавления. Остальные условные обозначения см. на рис. 2.

крейционно-коллизонных комплексов ЦАСП, содержащих вещество IAB- и E-MORB-типа. Наблюдаемое относительное обогащение HFS- и LIL-элементами более поздних базанитов при высоком содержании MgO, Cr, Ni в них не согласуется с ординарным снижением степени плавления мантийного перidotита. Как правило, аномальное накопление редких элементов в подобных породах считают следствием дополнительного поступления в расплав материала амфиболовых или флогопитовых жил из перidotитов трансформированной субконтинентальной литосферной мантии [4, 5]. Выявленные особенности состава базанитов могут свидетельствовать о генезисе щелочно-мафитовой магмы в результате локального декомпрессионного плавления литосферной

мантии, которая была модифицирована еще в период активности Сибирского плюма.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 22-27-00362.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ernst R.E.* Large Igneous Provinces. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 630 p.
2. *Furman T.* Melting of metasomatized subcontinental lithosphere: undersaturated mafic lavas from Rungwe, Tanzania // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1995. V. 122. P. 97–115.

3. *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.
4. *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.
5. *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. 3. P. 1913–1942.
6. *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.
7. *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.
8. *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.
9. *Добрецов Н.Л., Борисенко А.Г., Изох А.Э., Жмодик С.М.* Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометаллических месторождений // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 9. С. 1159–1187.
10. *Тимица Т.Ю., Шарыгин В.В.* Щелочные габброиды проявления Чирий (Северо-Минусинская впадина): минералогия и особенности эволюции расплава // *Геология и геофизика*. 2007. Т. 48. № 9. С. 950–973.
11. *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.
12. *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.
13. *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.
14. *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.
15. *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. Art. 21.
16. *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.
17. *Barbero E., Zaccarini F., Delavari M., Dolati A., Saccani E., Marroni M., Pandolfi L.* New evidence for Late Cretaceous plume-related seamounts in the Middle East sector of the Neo-Tethys: Constraints from geochemistry, petrology, and mineral chemistry of the magmatic rocks from the western Durkan Complex (Makran Accretionary Prism, SE Iran) // *Lithos*. 2021. V. 396–397. Art. 106228.

## GEOCHEMICAL SIGNS OF DIFFERENT DEEP-LEVEL MAGMA GENERATION FOR PERMIAN-TRIASSIC DOLERITES AND LATE CRETACEOUS BASANITES OF THE MINUSA PALEORIFT, SIBERIA

V. V. Vrublevskii<sup>a, #</sup>, A. D. Kotel'nikov<sup>a</sup>, P. A. Tishin<sup>a</sup>, A. E. Izokh<sup>b, a</sup>, F. Kazenova<sup>a</sup>, and I. O. Kremer<sup>a</sup>

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

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

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

Presented by Academician of the RAS V.V. Reverdatto April 28, 2022

The chemical composition of alkaline (basanites, Late Cretaceous) and subalkaline (dolerites, Permian-Triassic) basaltoids of different ages in the northern part of the Minusa trough was studied by optical emission spectroscopy and mass spectrometry with inductively coupled plasma. The revealed differences of subvolcanic rocks according to the nature of enrichment with HFS- and LIL-elements may indicate the generation of primary magmas at different depths and small degrees of melting of garnet and spinel mantle peridotites. The model of decompression partial melting of the subcontinental lithospheric mantle under garnet stability conditions is applicable for the formation of basanites. It is assumed that in the formation of dolerite magma, the melt from the less deep spinel peridotite interacted with the “OIB component” of the sublithospheric mantle plume.

*Keywords:* basaltic magmatism, basanite, dolerite, geochemistry, partial melting, subcontinental lithospheric mantle, mantle plume, Minusa paleorift