

УДК 552.3(470.5)

DOI: 10.24930/2500-302X-2024-24-5-834-847

Габбро мантийной части офиолитового разреза в Алапаевском дунит-гарцбургит-габбровом массиве (Восточная зона Среднего Урала)

В. Н. Смирнов¹, Ю. В. Ерохин¹, Ю. Л. Ронкин¹, И. И. Казаков², А. В. Коровко¹, Д. Д. Коровин¹

¹Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, e-mails: smirnov@igg.uran.ru; erokhin-yu@yandex.ru; y-ronkin@mail.ru; korovko@igg.uran.ru; korovin1997@rambler

²Уральская геологическая экспедиция, 620014, г. Екатеринбург, ул. Вайнера, 55, e-mail: kazakov@uralgeology.ru

Поступила в редакцию 01.02.2024 г., принята к печати 19.03.2024 г.

Объект исследования. Интрузивное тело габброидов, прорывающее мантийные перидотиты (дуниты и гарцбургиты) Алапаевского офиолитового массива (Восточная зона Среднего Урала). **Методы изучения.** Содержания петрогенных элементов определены рентгенофлуоресцентным методом, содержания редких и рассеянных элементов – методом ICP-MS. Возраст габброидов установлен ¹⁴⁷Sm-¹⁴³Nd ID-TIMS методом изотопного датирования. **Результат.** Показано, что габбро и вмещающие их ультрамафиты имеют практически одинаковый возраст – около 580 млн лет, что свидетельствует о их принадлежности к единой офиолитовой ассоциации вендского возраста. При этом габброиды Алапаевского массива резко отличаются как от изотропных, так и расслоенных габбро коровой части офиолитового разреза, фрагменты которого наблюдаются в пределах Восточной зоны Среднего Урала, значительно пониженным содержанием легких редкоземельных элементов, редких щелочей, бария, урана и тория, а также отсутствием на спайдер-диаграмме максимумов Rb. **Выводы.** Отмеченные особенности состава и интрузивная форма залегания габбро Алапаевского массива среди мантийных ультрамафитов свидетельствуют о том, что изученные породы не могут быть отождествлены с габброидами коровой части офиолитовой ассоциации. Это позволяет заключить, что исследованная достаточно крупная интрузия габбро является аналогом мелких жил и даек габброидов, наблюдаемых среди мантийных перидотитов в ряде офиолитовых массивов, таких как Войкаро-Сыньинский массив на Полярном Урале и офиолит Семейл в Омани. Особенности распределения редких элементов на спайдер-диаграммах габброидов Алапаевского массива: наличие максимумов Sr и Ba и минимумов Nd и Th, а также гарцбургитовый состав мантийного рестита, вмещающего рассматриваемое габбровое тело, свидетельствуют о том, что формирование вендской офиолитовой ассоциации Восточной зоны Среднего Урала происходило в надсубдукционной (преддуговой) обстановке. Предложена модель образования крупных масс габбро в мантийной части офиолитового разреза

Ключевые слова: офиолиты, габбро, геохимия, возраст, Алапаевский массив, Средний Урал

Источник финансирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00027, <https://rscf.ru/project/22-17-00027/>

Gabbro of the mantle part of the ophiolite section in the Alapaevsky dunite-harzburgite-gabbro massif (Eastern zone of the Middle Urals)

Vladimir N. Smirnov¹, Yuriy V. Erokhin¹, Yuriy L. Ronkin¹, Igor I. Kazakov², Anatoly V. Korovko¹, Dmitry D. Korovin¹

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia, e-mails: smirnov@igg.uran.ru; erokhin-yu@yandex.ru; y-ronkin@mail.ru; korovko@igg.uran.ru; korovin1997@rambler.ru

²Ural geological survey expedition, 55 Vayner st., Ekaterinburg 620014, Russia, e-mail: kazakov@uralgeology.ru

Received 01.02.2024, accepted 19.03.2024

Research subject. An intrusive body of gabbroids breaking through mantle peridotites (dunites and harzburgites) of the Alapaevsky ophiolite massif (Eastern zone of the Middle Urals). **Methods.** The contents of petrogenic elements were determined by the X-ray fluorescence method; the contents of rare and scattered elements were studied by the ICP-MS

Для цитирования: Смирнов В.Н., Ерохин Ю.В., Ронкин Ю.Л., Казаков И.И., Коровко А.В., Коровин Д.Д. (2024) Габбро мантийной части офиолитового разреза в Алапаевском дунит-гарцбургит-габбровом массиве (Восточная зона Среднего Урала). *Литосфера*, 24(5), 834–847. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-5-834-847>

For citation: Smirnov V.N., Erokhin Yu.V., Ronkin Yu.L., Kazakov I.I., Korovko A.V., Korovin D.D. (2024) Gabbro of the mantle part of the ophiolite section in the Alapaevsky dunite-harzburgite-gabbro massif (Eastern zone of the Middle Urals). *Lithosphere (Russia)*, 24(5), 834–847. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-5-834-847>

© В.Н. Смирнов, Ю.В. Ерохин, Ю.Л. Ронкин, И.И. Казаков, А.В. Коровко, Д.Д. Коровин, 2024

method. The age of gabbroids was determined by ^{147}Sm - ^{143}Nd ID-TIMS by isotope dating. *Results.* The gabbro and their containing ultramafic rocks were established to be of almost the same age of about 580 Ma, which indicates their belonging to a single ophiolite association of the Vendian age. At the same time, the gabbroids of the Alapaevsky massif differ sharply from both isotropic and stratified gabbro of the crustal part of the ophiolite section, fragments of which are observed within the Eastern zone of the Middle Urals, in terms of a significantly reduced content of light REE, rare alkalis, barium, uranium and thorium, as well as the absence of Pb maxima on spider diagrams. *Conclusions.* The established features in the composition and intrusive occurrence of the gabbro of the Alapaevsky massif among mantle ultramafic rocks indicate that the studied rocks cannot be identified with gabbroids of the crustal part of the ophiolite association. This suggests that this rather large intrusion of gabbro may be analogous to small veins and dikes of gabbroids observed among mantle peridotites in a number of ophiolite massifs, such as Voikar-Synyinsky massif in the Polar Urals and the Samail ophiolite in Oman. The distribution specifics of rare elements on the spider diagrams of the gabbroids of the Alapaevsky massif, i.e., the presence of Sr and Ba maxima and Nd and Th minima, as well as the Harzburgite composition of the mantle restite containing the gabbro body under consideration, indicate that the Vendian ophiolite association of the Eastern zone of the Middle Urals formed in a suprasubduction (pre-arc) environment. A model for the formation of large masses of gabbro in the mantle part of the ophiolite section is proposed.

Keywords: ophiolites, gabbro, geochemistry, age, Alapaevsky massif, Middle Urals

Funding information

The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 22-17-00027, <https://rscf.ru/project/22-17-00027/>

ВВЕДЕНИЕ

Алапаевский мафит-ультрамафитовый массив – типичный для восточного сектора Урала массив офиолитового типа. Ультраосновные породы этого массива представлены в разной степени серпентинизированными дунитами и гарцбургитами, являющимися, по общему мнению, фрагментами мантийной части офиолитового разреза. Породы основного состава, как и в преобладающей части офиолитовых массивов Урала, представляют собой преобразованные процессами зеленокаменного метаморфизма габброиды. В ряде выполненных ранее работ (главным образом региональных геологических исследований) габброиды рассматриваются в качестве самостоятельного Александровского габбрового массива. Однако, поскольку к настоящему времени достигнуто понимание того, что габброиды совместно с ассоциирующими с ними дунитами и гарцбургитами входят в состав офиолитовой ассоциации и отнесены к одному плутоническому комплексу (алапаевскому дунит-гарцбургит-габбровому), более целесообразным представляется рассматривать эти образования как единый Алапаевский мафит-ультрамафитовый массив.

При типичном для офиолитов Урала петрографическом составе Алапаевский массив обладает важной отличительной особенностью, заключающейся в том, что по геологическому положению входящие в его состав габбро принципиально отличаются от аналогичных пород других офиолитовых массивов. Многочисленными исследованиями офиолитовых ассоциаций по всему миру установлено, что габброиды присутствуют главным обра-

зом в составе коровой части офиолитового разреза (габброидный комплекс офиолитов). Считается, что в мантийной части офиолитов (ультрабазитовый комплекс) породы основного состава слагают только немногочисленные дайки и жилы (Coleman, 1977; и мн. др.). Однако в Алапаевском массиве габброиды образуют достаточно крупное тело, прорывающее вмещающие его ультрамафиты мантийного генезиса. Это побудило авторов уделить особое внимание изучению этих пород в целях выяснения их природы. Результаты проведенных исследований изложены в настоящей работе.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И СТРОЕНИЕ АЛАПАЕВСКОГО МАССИВА

Алапаевский дунит-гарцбургит-габбровый массив представляет собой ограниченный со всех сторон разрывными нарушениями блок пород офиолитовой ассоциации, приуроченный к Баженовской шовной зоне (Смирнов, Иванов, 2019; Смирнов и др., 2019) – системе разрывных нарушений, отделяющих палеозойские вулканогенные, вулканогенно-осадочные и осадочные комплексы Восточной зоны Среднего Урала от блоков кристаллического фундамента (Сысертско-Ильменогорского, Мурзинско-Адуйского, Гаёвского) и разделяющих их мульд, сложенных вулканогенно-осадочными палеозойскими образованиями (Смирнов и др., 2003).

На современном эрозионном срезе Алапаевский массив имеет форму сильно вытянутого в субмеридиональном направлении овала, выклинивающегося в северном и южном направлениях (рис. 1). Его длина около 85 км и ширина до 13 км. По дан-

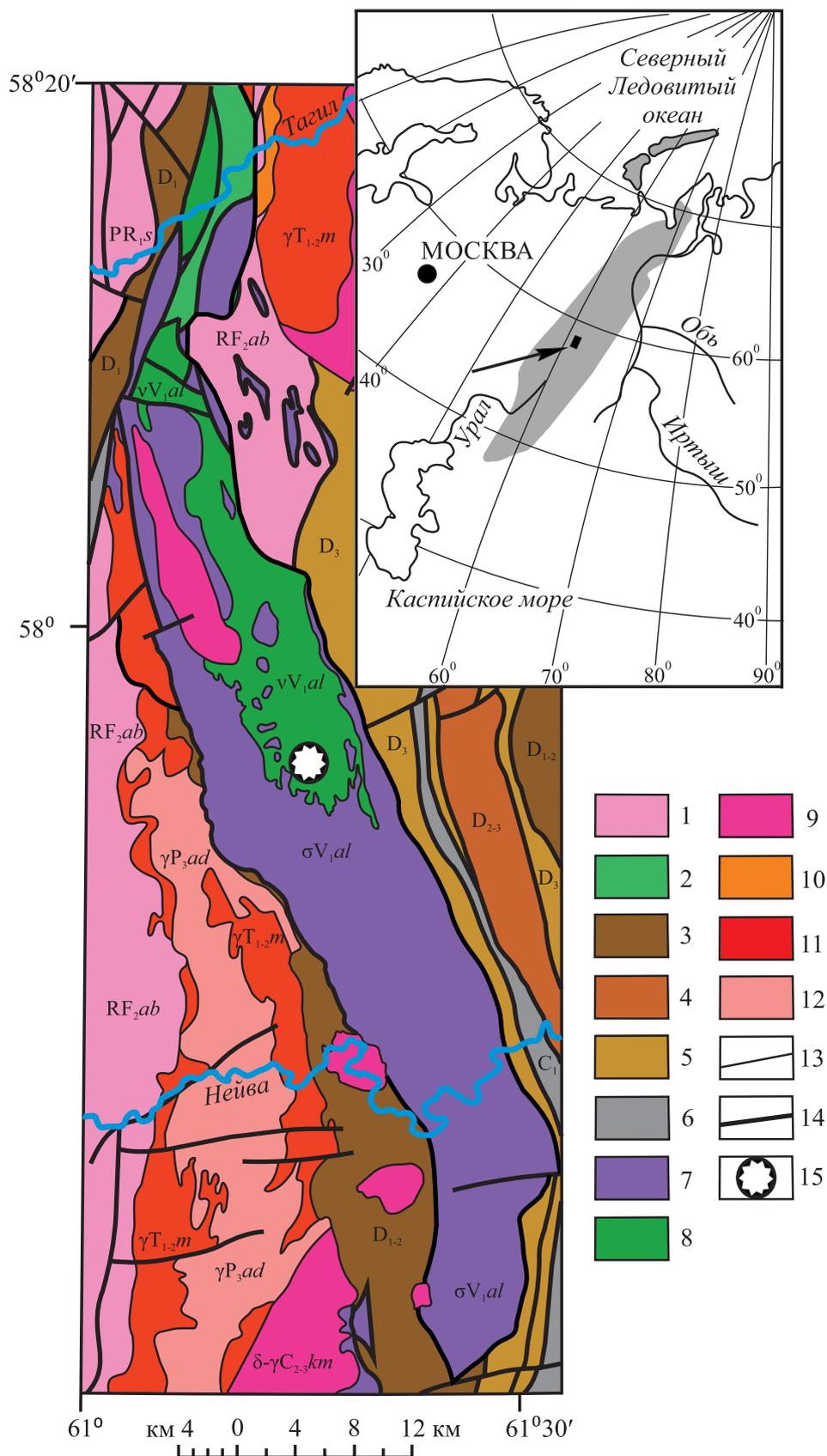


Рис. 1. Геологическое строение Алапаевского массива (на основе госгеолкарта масштаба 1:200 000).

1 – докембрийские метаморфические толщи: раннепротерозойские салдинский комплекс (PR_{1s}) и среднерифейская алабашская серия (RF_{2ab}); 2 – позднеордовикские вулканогенные породы (белоярская толща; O_{3bj}); 3 – ниже- и среднедевонские вулканогенные и вулканогенно-осадочные толщи: медведевская (D_{1md}) и рудянская (D_{1,2rd}); 4 – средне- и верхнедевонская маминская вулканогенно-осадочная толща (D_{2,3mm}); 5 – верхнедевонские осадочные и осадочно-вулканогенные породы: кодинская (D_{3kd}) и устькодинская (D_{3uk}) свиты; 6 – нижнекаменноугольные осадочные породы: бекленищевская (C_{1bk}), арамильская (C_{1ar}) и исетская (C_{1is}) свиты; 7, 8 – породы алапаевского дунит-гарцбургит-габбрового комплекса: 7 – в разной степени серпентинизированные дуниты и гарцбургиты, редко клинопироксениты (σV_{1al}), 8 – зеленокаменно измененные габброиды (vV_{1al}); 9 – средне- и позднедевонские гранодиориты и граниты каменского комплекса (δ-γC_{2,3km}); 10 – раннепермские умереннощелочные граниты и лейкограниты петуховского комплекса (γ-lyP_{1pt}); 11 – позднепермские граниты адуйского комплекса (γP_{3ad}); 12 – триасовые граниты мурзинского комплекса (γT_{1,2m}); 13 – ненарушенные геологические границы; 14 – разрывные нарушения; 15 – Северный карьер Южно-Александровского месторождения строительного камня.

Fig. 1. The geological structure of the Alapaevsky massif (based on a 1:200 000 scale State Geological Map).

1 – Precambrian metamorphic strata: Early Proterozoic saldinsky (PR_{1s}) and Middle-Siberian alabashskaya series (RF_{2ab}); 2 – Late Ordovician volcanogenic rocks (beloyarskaya strata; O_{3bj}); 3 – Lower and Middle Devonian volcanogenic and volcanogenic sedimentary strata: medvedevskaya (D_{1md}) and rudyanskaya (D_{1,2rd}); 4 – the Middle-Upper Devonian maminskaya volcanogenic sedimentary strata (D_{2,3mm}); 5 – Upper Devonian sedimentary and sedimentary-volcanogenic rocks: kodinskaya (D_{3kd}) and ustkodinskaya (D_{3uk}) formations; 6 – Lower carboniferous sedimentary rocks: beklenshchevskaya (C_{1bk}), aramils-kaya (C_{1ar}) and isetskaya (C_{1is}) suite; 7, 8 – rocks of the Alapaevsky dunite-harzburgerite-gabbro complex: 7 – serpentinized dunites and harzburgites to varying degrees, rarely clinopyroxenites (σV_{1al}), 8 – greenstone-alternated gabbroids (vV_{1al}); 9 – Middle-Late Devonian granodiorites and granites of the kamensky complex (δ-γS_{2,3km}); 10 – Early Permian mid-alkaline granites and leucogranites of the petukhovskiy complex (γ-lyP_{1pt}); 11 – Late Permian granites of the aduiskiy complex (γP_{3ad}); 12 – Triassic granites of the murzinskiy complex (γT_{1,2m}); 13 – undisturbed geological boundaries; 14 – faults; 15 – The Northern quarry of the Yuzhno-Alexandrovskiy building stone deposit.

ным геофизических исследований, форма массива в его южной половине пластообразная с падением контактов под массив, что позволяет рассматривать его как тектонический покров, перекрывающий девонские вулканогенные и вулканогенно-осадочные толщи. Глубина залегания подошвы массива в этой его части изменяется от 0.5 до 4.8 км. Северная часть массива, располагающаяся в промежутке между Мурзинско-Адуйским и Гаёвским блоками кристаллических пород, подверглась наиболее сильным деформациям, в результате которых была разбита на серию пластообразных линейных в плане тектонических пластин (блоков) шириной от 1 до 4 км, погружающихся в западном направлении.

Преобладающая часть массива (около 70% площади его выхода на поверхность) сложена породами ультраосновного состава: серпентинитами, серпентинизированными гарцбургитами и в меньшей степени дунитами, которые связаны постепенными переходами. В крайне незначительном количестве присутствуют также пироксениты, верлиты и лерцолиты. Габброиды слагают тело сложной формы, вытянутое с севера на юг на 35 км тело при ширине от 2 до 6 км. В северной части массива все контакты габбро с боковыми породами тектонические. В южной части граница габброидов с вмещающими ультрамафитами имеет сложную конфигурацию с многочисленными апофизами. В экзоконтактных частях габбрового тела присутствуют ксенолиты вмещающих ультраосновных пород, а в эндоконтактах – реакционная оторочка пироксенитов. Непосредственно контакт габбро с ультрамафитами авторами не наблюдался, но перечисленные особенности позволяют считать, что он явля-

ется интрузивным: габброиды прорывают дуниты и гарцбургиты.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Алапаевский массив характеризуется очень плохой обнаженностью. Немногочисленные коренные выходы, представленные ультраосновными разновидностями пород, наблюдаются только в долине р. Нейва. Естественные выходы габброидов этого массива отсутствуют совсем, и площадь их распространения откартирована по результатам проходки шурфов, большая часть которых вскрыла лишь коры выветривания, керну редких буровых скважин и геофизическим данным. Единственным местом, где габброиды доступны для изучения, является Северный карьер Южно-Александровского месторождения строительного камня. В разных частях этого карьера авторами отобрано четыре пробы габбро для изучения их петро- и геохимических особенностей. Проба Ал-3 отобрана из верхней части борта в северо-западной части карьера (координаты точки отбора: 57°54'47.4" с.ш. и 61°14'37.2" в.д.), пр. Ал-4 – из нижней части северного борта карьера (57°54'43.4" с.ш. и 61°14'38.4" в.д.), пр. Ал-5 – в восточной части северного борта карьера (57°54'44.8" с.ш. и 61°14'39.5" в.д.), проба Ал-7 – у южного борта карьера (57°54'41.3" с.ш. и 61°14'27.8" в.д.).

Проведенные исследования включали изучение различий в составе изученных пород и габброидов из других офиолитовых массивов Восточной зоны Среднего Урала. Для сравнения использованы аналитические данные из коллекции авто-

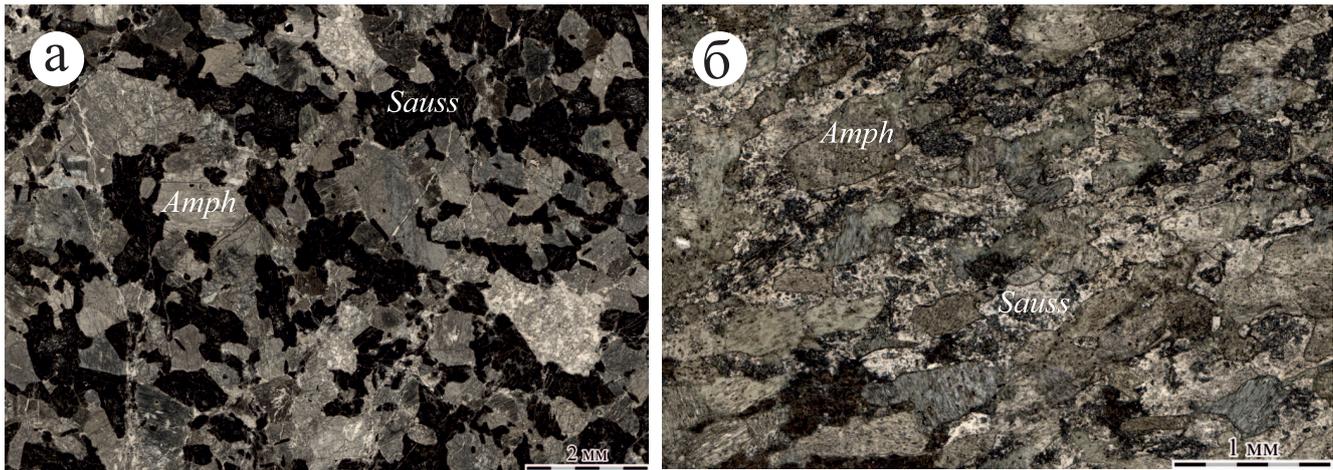


Рис. 2. Микроструктура габбро Алапаевского массива.

а – аллотриоморфнозернистая, шлиф Ал-7; б – гипидиоморфнозернистая, шлиф Ал-4. *Amph* – амфибол, *Sauss* – соссурит.

Fig. 2. The microstructure of Alapaevsky massif gabbro.

а – allotriomorphic grained, thin section Ал-7; б – hypidiomorphic grained, thin section Ал-4. *Amph* – amphibole, *Sauss* – saussurite.

ров: по изотропным габбро из Быстринского массива (Смирнов и др., 2021) и из скринов в комплексе параллельных даек в Рефтинском массиве (Лобова, 2013), по расслоенным габбро Ключевского массива (Симонов и др., 2008; Smirnov et al., 2022) и из блока офиолитовых пород в Рефтинском массиве (Лобова, 2012).

Содержание петрогенных элементов определялось в ЦКП “Геоаналитик” рентгенофлуоресцентным методом на рентгеновском многоканальном спектрометре СРМ-35 (аналитики И.А. Желуницын, Л.А. Татарина). Анализ содержания редких и рассеянных элементов выполнен в Южно-Уральском федеральном научном центре минералогии и геоэкологии УрО РАН (г. Миасс) на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 7700х (аналитики К.А. Филиппова, П.А. Карионова).

Определение концентраций Sm, Nd и величин $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в процессе изотопного датирования осуществлялось масс-спектрометрическим методом изотопного разбавления (ID) с использованием смешанного спайка $^{149}\text{Sm} + ^{150}\text{Nd}$ и последующим анализом результирующих смесей с помощью мультиколлекторного масс-спектрометра Triton (TIMS) в статическом режиме. Контроль за правильностью и точностью определения изотопного состава Sm и Nd выполнен путем многократных измерений соответствующих величин в стандартах LaJolla ($n = 21$) и BCR-2 ($n = 26$). Результаты измерений изотопного состава Sm, Nd этих стандартов приведены далее по тексту. Более подробные сведения об аналитических процедурах можно найти в опубликованной ранее работе (Ронкин и др., 2021).

ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗУЧЕННЫХ ГАББРОИДОВ

Габброиды Южно-Александровского месторождения представляют собой массивные преимущественно мелкозернистые (до среднезернистых) породы зеленовато-серого цвета, состоящие из приблизительно равных количеств бледно-зеленого амфибола, псевдоморфно замещающего зерна первичного темноцветного минерала (или нескольких минералов), и полностью соссуритизированного плагиоклаза. Реликтов первичных магматических минералов не обнаружено, но исходная структура породы сохранилась неизменной. Наблюдаемый характер преобразований габброидов соответствует зеленокаменной ступени метаморфизма. Размер зерен первичных породообразующих минералов варьируется от 0.5 до 2 мм, преобладают зерна размером около 1 мм. Микроструктура преимущественно аллотриоморфнозернистая, довольно часто переходящая в гипидиоморфнозернистую. Часто характер структуры меняется на незначительном расстоянии, иногда в пределах одного шлифа (рис. 2). При этом одинаково часто наблюдаются случаи, когда зерна плагиоклаза идиоморфны по отношению к темноцветному минералу и, наоборот, когда более высокой степенью идиоморфизма обладают зерна темноцветного минерала.

Содержания главных породообразующих окислов и элементов-примесей в изученных приведены в табл. 1. Пересчеты анализов этих пород по методу CIPW показали, что по химическому составу пр. Ал-3 и Ал-7 соответствуют оливиновым габбро, а пр. Ал-4 и Ал-5 – оливиновым габбро-норитам.

Таблица 1. Содержание петрогенных (мас. %) и редких (ppm) элементов в габбро Алапаевского массива
Table 1. Content of petrogenic (wt %) and trace (ppm) elements in the gabbro of the Alapaevsky massif

Компонент	Пр. Ал-3	Пр. Ал-4	Пр. Ал-5	Пр. Ал-7
SiO ₂	46.41	47.48	47.76	45.13
TiO ₂	0.352	0.371	0.385	0.196
Al ₂ O ₃	14.58	13.93	15.01	15.00
Fe ₂ O ₃	2.98	4.60	4.32	1.86
FeO	5.3	3.9	4.2	4.2
MnO	0.137	0.119	0.132	0.097
MgO	10.47	10.30	10.23	12.88
CaO	14.96	15.21	12.74	16.21
Na ₂ O	1.80	1.64	2.04	1.23
K ₂ O	0.08	0.04	0.06	0.03
P ₂ O ₅	0.001	0.001	0.001	0.001
П. п. п.	2.70	2.30	2.90	3.10
Сумма	99.78	99.89	99.78	99.93
Fe/(Fe + Mg)	0.30	0.30	0.31	0.20
Li	0.84	0.33	0.92	0.63
Rb	0.76	0.27	0.53	0.39
Sr	122	160	120	95.6
Ba	7.60	8.80	15.5	6.79
Sc	41.1	42.3	42.8	46.1
V	152	166	163	151
Cr	391	347	327	757
Co	53.2	42.3	47.3	60.9
Ni	104	89.0	113	215
Cu	51.3	59.7	65.6	112
Zn	26.2	19.8	29.4	24.3
Ga	10.4	11.2	10.6	9.01
Y	7.72	8.21	8.96	4.78
Nb	0.068	0.33	0.57	0.55
Ta	0.134	0.120	0.123	0.950
Zr	9.73	9.40	12.20	5.22
Hf	0.31	0.34	0.38	0.24
Sn	0.220	0.184	0.110	0.100
U	<0.010	0.024	0.030	0.015
Th	0.030	<0.010	0.011	0.017
La	0.35	0.48	0.50	0.116
Ce	1.03	1.25	1.20	0.34
Pr	0.22	0.26	0.28	0.075
Nd	1.60	1.75	1.93	0.54
Sm	0.79	0.78	0.80	0.30
Eu	0.41	0.44	0.47	0.22
Gd	1.06	1.13	1.24	0.55
Tb	0.22	0.23	0.25	0.12
Dy	1.50	1.59	1.77	0.83
Ho	0.32	0.35	0.38	0.19
Er	0.82	0.88	0.95	0.54
Tm	0.138	0.142	0.156	0.078
Yb	0.84	0.86	0.94	0.51
Lu	0.126	0.137	0.148	0.075

Примечание. Во всех пробах содержание Cs < 0.020, Be < 0.050, Mo < 0.10, Tl < 0.010, Pb < 0.10.

Note. In all samples, the contents of Cs < 0.020, Be < 0.050, Mo < 0.10, Tl < 0.010, Pb < 0.10.

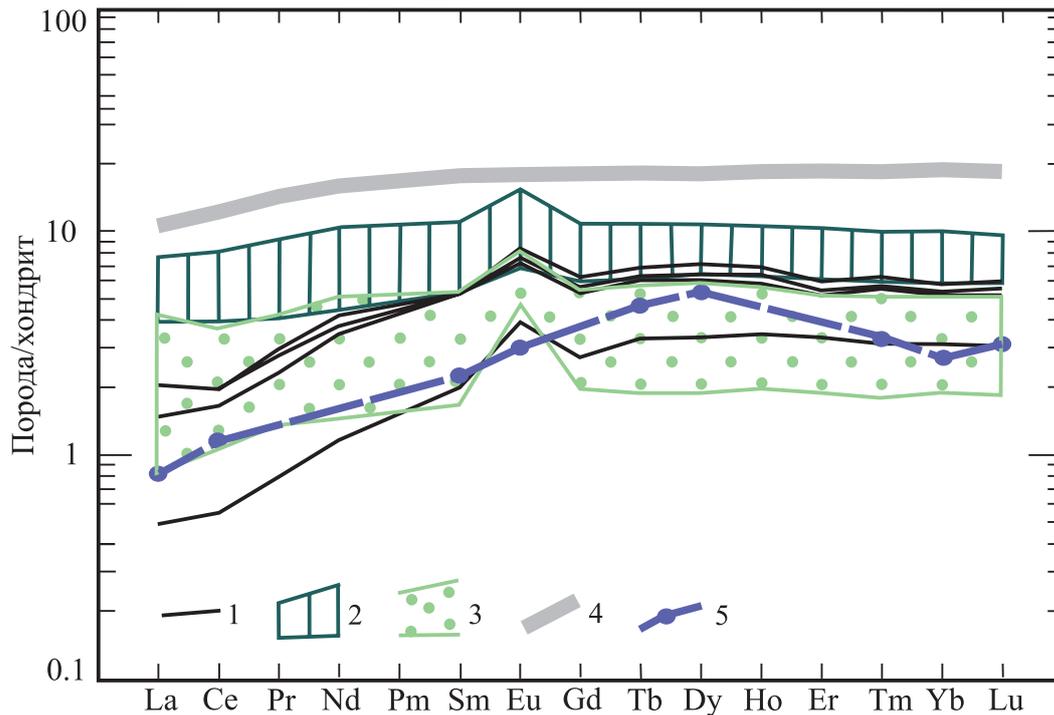


Рис. 3. Нормированное по хондриту (McDonogh, Sun, 1995) распределение редкоземельных элементов в габброидах Алапаевского массива в сравнении с разными типами габбро из офиолитовой ассоциации Восточной зоны Среднего Урала.

1 – габброиды Алапаевского массива; 2, 3 – поля составов габбро из офиолитовой ассоциации Восточной зоны Среднего Урала: 2 – изотропные габбро, 3 – габбро расслоенной части офиолитового разреза; 4 – MORB (Sun, McDonogh, 1989); 5 – габбро из дайки, секущей мантийный перидотит в офиолите Семейл, обр. С-206а (Pallister, Knight, 1981).

Fig. 3. Chondrite-normalized (McDonogh, Sun, 1995) distribution of rare-earth elements in gabbroids of the Alapaevsky massif in comparison to different types of the gabbroids from ophiolite association of Eastern zone of Middle Urals.

1 – gabbroids of the Alapaevskiy massif; 2, 3 – the fields of the composition of gabbros from the ophiolite association of Eastern zone of Middle Urals: 2 – isotropic gabbros, 3 – gabbros of stratiform part of ophiolite section; 4 – MORB (Sun, McDonogh, 1989); 5 – gabbros from a dike in mantle peridotite of the Samail Ophiolite, sample C-206a (Pallister, Knight, 1981).

При наличии заметных вариаций в содержании большинства элементов все проанализированные образцы обладают хорошо выраженными общими особенностями состава. Для них характерны высокие содержания Ca (12.74–16.21 мас. % CaO), Mg (10.23–12.88 мас. % MgO), Cr (327–757 г/т), Ni (89–215 г/т) при низких количествах Ti (менее 0.4 мас. % TiO₂), щелочей (< 2 мас. % Na₂O и < 0.1 мас. % K₂O), Sr (< 200 г/т) и низкой величине железистости (Fe/(Fe + Mg) = 0.20–0.31).

Все изученные образцы габброидов Алапаевского массива имеют низкое содержание редкоземельных элементов – 4.48–11.3 г/т (среднее значение – 8.80 г/т). В их составе резко преобладают элементы тяжелой части спектра, величина (La/Yb)_n составляет 0.16–0.40 при среднем значении 0.31. Графики распределения РЗЭ рассматриваемых габбро (рис. 3) имеют положительную европиевую аномалию (Eu/Eu* = 1.31–3.29).

Нормированное по примитивной мантии распределение литофильных элементов на мультикомпонентной диаграмме (рис. 4) демонстрирует низкое (на уровне N-MORB и ниже) содержание всех редких и рассеянных элементов и характеризуется наличием отчетливо выраженных максимумов Sr и Ba, а также минимумов Nd и Th.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗОТОПНОГО ДАТИРОВАНИЯ

Первые изотопные данные о возрасте пород Алапаевского массива получены Г.А. Петровым с соавторами (2010). Ультраосновные породы датированы ими U–Pb LA ICP-MS методом по цирконам из густовкрапленных хромитовых руд Курмановского месторождения, в результате чего получено два возрастных кластера: 588 ± 16 млн лет, СКВО = 0.108 и 428.5 ± 8.5 млн лет, СКВО = 0.073.

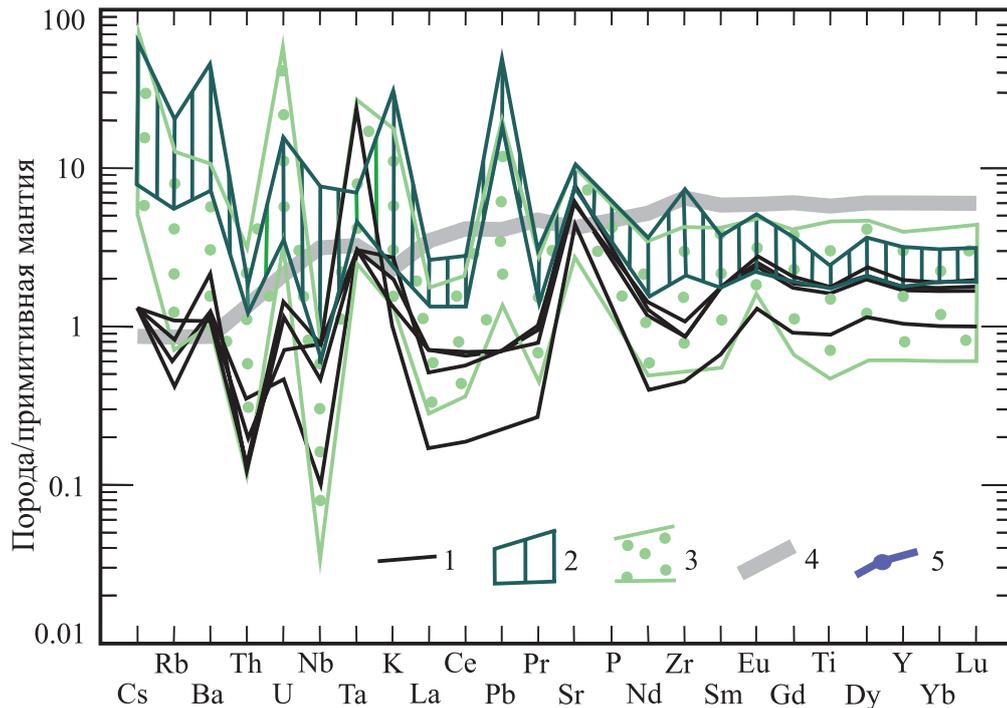


Рис. 4. Нормированное по примитивной мантии (Sun, McDonogh, 1989) распределение рассеянных элементов в габбро Алапаевского массива в сравнении с разными типами габброидов из офиолитовой ассоциации Восточной зоны Среднего Урала.

Условные обозначения – см. рис. 3.

Fig. 4. Normalized to primitive mantle distribution of the trace elements in the gabbros of the Alapaevsky massif in comparison to different types of the gabbroids from the ophiolite association of Eastern zone of Middle Urals.

Explanations – see Fig. 3.

По амфибол-соссюритовым габбро из Южно-Александровского месторождения строительного камня ^{147}Sm - ^{143}Nd -методом (эрохрона по монофракциям плагиоклаза, амфибола из амфибол-соссюритовых габбро и породе в целом) получен возраст 579 ± 42 млн лет при СКВО = 2.7.

В процессе подготовки к изданию геологической карты 1:200 000 выполнено повторное ^{147}Sm - ^{143}Nd датирование габбро этого же месторождения (обр. 3800/160) по монофракциям соссюритизированного плагиоклаза, амфибола и породе в целом, результаты которого представлены в табл. 2 и на рис. 5. Вычисление параметров регрессионной зависимости и ее графическая визуализация (см. рис. 5) осуществлялись с помощью программного обеспечения Isoplot/EX ver 3.0 (Ludwig, 2003). Диапазон наблюдаемых вариаций значений $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ изученных разностей характеризуется довольно значимым размахом – (0.2002 ± 0.0010) – (0.3155 ± 0.0016) , что определяет известную значимость полученным Sm-Nd параметрам на графике Николайсена. Аппроксимация ^{147}Sm - ^{143}Nd изотопных данных по породе в целом и выделенным из

нее монофракциям плагиоклаза и амфибола на графике в координатах $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ – $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ определяет изохронную зависимость (СКВО = 0.09, модель I (McIntyre et al., 1966)), наклон которой соответствует возрасту 580 ± 14 млн лет, что, согласно геохронологической шкале (International Chronostratigraphic Chart, ver. 2023/04), соответствует неопротерозойскому, эдиакарскому времени. Вычисленное значение первичного отношения $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0 = 0.512151 \pm 0.000023$ в терминах модельных представлений соответствует величине $\epsilon_{\text{Nd}} = +5.1$, характеризующая деплетированный источник для изученного вещества.

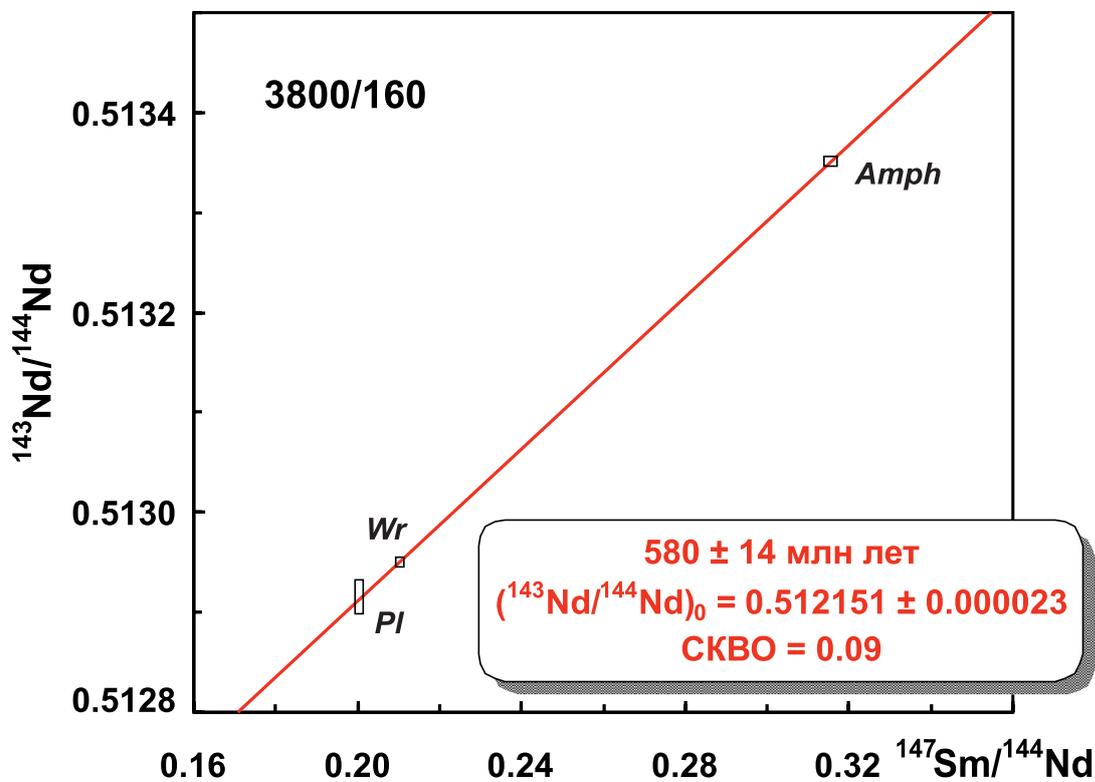
Очевидно, что совпадающие в пределах погрешностей анализа неопротерозойские (вендские) значения возраста 588–579 млн лет, полученные как для габбро, так и для ультрамафитов Алапаевского массива, фиксируют время формирования офиолитовой ассоциации. Более молодой палеозойский возраст 428.5 ± 8.5 млн лет (Петров и др., 2010), полученный по пяти кристаллам циркона из сильно-измененной (серпентин-хромитовой) породы ультраосновного состава, по всей вероятности, следу-

Таблица 2. ^{147}Sm - ^{143}Nd ID-TIMS данные для габбро 3800/160 Алапаевского массива**Table 2.** ^{147}Sm - ^{143}Nd ID-TIMS data for gabbro 3800/160 of the Alapaevsky massif

№ п.п.	Образец/стандарты	Sm, г/т	Nd, г/т	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$
1	3800/160 <i>Pl</i>	0.160	0.483	0.2002	0.0010	0.512915	0.000017
2	3800/160 <i>Wr</i>	0.301	0.865	0.2104	0.0011	0.512951	0.000005
3	3800/160 <i>Amph</i>	0.476	0.913	0.3155	0.0016	0.513351	0.000005
4	La Jolla Nd (n = 21)	–	–	–	–	0.511858	0.000005
5	BCR-2 (n = 26)	6.51	28.4	0.1385	0.0004	0.512637	0.000008

Примечание. *Pl* – плагиоклаз, *Wr* – порода в целом, *Amph* – амфибол. La Jolla Nd и BCR-2 стандарты для контроля точности измерения изотопного состава Nd и концентраций Sm, Nd соответственно.

Note. *Pl* – plagioclase, *Wr* – rock as a whole, *Amph* – amphibole. La Jolla Nd, BCR-2. La Jolla Nd, BCR-2 standards for monitoring the accuracy of measurements of Nd isotopic composition and Sm, Nd concentrations, respectively.

**Рис. 5.** $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ эволюционная зависимость для габбро Алапаевского массива, обр. 3800/160.

Размеры прямоугольников пропорциональны $\pm 2\sigma$ погрешностям соответствующих величин. *Pl* – плагиоклаз, *Wr* – порода в целом, *Amph* – амфибол.

Fig. 5. $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ evolutionary relationship for gabbro of the Alapaevsky massif, sample 3800/160.

The dimensions of the rectangles are proportional to the $\pm 2\sigma$ uncertainties of the corresponding values. *Pl* – plagioclase, *Wr* – whole rock, *Amph* – amphibole.

ет рассматривать как время метаморфических преобразований. Ранее при датировании Ключевского офиолитового массива было показано, что палеозойские возрасты цирконов из пород офиолитовой ассоциации являются результатом метамор-

физма в процессе их перемещения из глубинных горизонтов (8–13 км) в приповерхностную часть коры (Смирнов и др., 2016; Smirnov et al., 2022). Повидимому, этим же объясняются и палеозойские датировки цирконов из пород Алапаевского массива.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Выше уже говорилось, что особый интерес к габброидам Алапаевского массива обусловлен необычным для этих пород геологическим положением. В классических офиолитовых разрезах достаточно крупные массы плутонических пород основного состава присутствуют только в их верхней части (габброидный комплекс офиолитов), слагающая нижнюю толщу расслоенных габброидов, переслаивающихся с дунитами, верлитами и пироксенитами, и верхнюю толщу изотропных габбро. В составе ультрабазитового комплекса (мантийная часть офиолитов) базиты либо отсутствуют, либо представлены только немногочисленными жилами и дайками (Coleman, 1977; и др.). В Алапаевском же массиве достаточно крупное габбровое тело залегает среди мантийных дунитов и гарцбургитов и имеет с ними типичные интрузивные (рвущие) взаимоотношения. На основании этого можно было бы предположить, что габбро представляют собой более молодые по отношению к породам офиолитовой ассоциации образования, внедрившиеся уже после завершения процессов ее формирования. Однако приведенные выше результаты изотопного датирования показывают, что рассматриваемые габброиды имеют практически тот же изотопный возраст, что и мантийные ультрамафиты Алапаевского массива, – около 580 млн лет, что однозначно указывает на их принадлежность к единой ассоциации пород. Анализ петро- и геохимических особенностей рассматриваемых образований подтверждает этот вывод. Г.Б. Ферштатером (1987) на большом фактическом материале показано, что габбро офиолитовой ассоциации обладают хорошо выраженными особенностями состава, резко отличаясь от габброидов из ассоциаций других типов (Платиноносного пояса и габбро-гранитоидных комплексов Урала) более высокими содержаниями Ca, Mg, Cr и Ni при пониженных количествах щелочей, Ti, Sr и низкой величине железистости. Именно эти особенности состава присущи описываемым породам, поэтому их принадлежность к офиолитовой ассоциации вендского возраста не вызывает сомнений.

При этом более детальный анализ состава описываемых пород с использованием результатов определения содержания элементов-примесей современными прецизионными методами показал, что они имеют заметные отличия от габбро из других изучавшихся ранее массивах Восточной зоны Среднего Урала. Содержание редкоземельных элементов в габброидах Алапаевского массива (среднее значение суммы РЗЭ – 8.80 г/т) заметно понижено по сравнению с изотропными габбро (12–24 г/т, среднее – 18.32 г/т), хотя близко к их содержаниям в габброидах расслоенной части офиолитового разреза (4.29–11.68 г/т, среднее – 7.51 г/т). Тем не

менее различие в содержаниях РЗЭ между описываемыми породами и расслоенными габбро все же имеется, хотя и выражено не столь отчетливо. Оно заключается в том, что последние, как правило, имеют более высокую долю элементов легкой части спектра. Среднее значение величины $(La/Yb)_n$ в них составляет 0.54, тогда как в габброидах Алапаевского массива элементы тяжелой части спектра всегда заметно преобладают ($(La/Yb)_n = 0.16–0.40$ при среднем значении 0.31).

Графики распределения литофильных редких элементов на мультикомпонентной диаграмме (см. рис. 4) имеют выраженные максимумы Sr и Ba, а также минимумы Nd и Th, свойственные всем габбро офиолитовой ассоциации Восточной зоны Среднего Урала. При этом различия между изученными породами и габброидами разного типа (изотропными и расслоенными) из других офиолитовых массивов востока Среднего Урала также выражены отчетливо. Фундаментальное отличие заключается в значительно пониженном, по сравнению с другими типами офиолитовых габбро, содержанием в изученных породах редких щелочей, бария, урана и тория. Кроме того, на графиках нормированного распределения редких элементов в рассматриваемых породах отсутствуют максимумы Pb, свойственные офиолитовым габбро других массивов.

Особенности характера распределения редких элементов на спайдер-диаграмме, общие для всех габброидов офиолитовой ассоциации востока Среднего Урала, – наличие максимумов Sr и Ba, а также минимумов Nd и Th – считаются отличительной чертой островодужных базальтоидов (Holm, 1985; Вольнец и др., 1990; и др.). Среди базитов офиолитовой ассоциации эти особенности, судя по опубликованным данным, наиболее хорошо выражены в породах, сформировавшихся в преддуговой обстановке (Dilek, Furnes, 2011). Гарцбургитовый состав мантийного рестита, вмещающего рассматриваемое габбровое тело, также, по мнению ряда исследователей, характерен для преддуговых обстановок (Stern, Bloomer, 1992; Shervais, 2001; и др.). Изложенные соображения, по мнению авторов, являются достаточным основанием для вывода о надсубдукционных, скорее всего преддуговых, условиях формирования вендских офиолитов Восточной зоны Среднего Урала.

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос о причинах принципиальных различий между габброидами Алапаевского массива и аналогичными породами других офиолитовых массивов рассматриваемого региона. Отмеченные выше различия по содержанию большинства редких элементов и характеру их распределения на спайдер-диаграмме между характеризуемыми породами и входящими в состав других офиолитовых массивов Восточной зоны изотропными габбро и габбро из рас-

слоенного разреза свидетельствуют о том, что изученные породы не могут быть отождествлены с габброидами коровой части офиолитовой ассоциации. На это же указывает и интрузивная форма залегания габбрового тела среди мантийных ультрамафитов. Таким образом, напрашивается вывод, что это достаточно крупное габбровое тело является аналогом жил и даек габброидов, залегающих среди мантийных перидотитов в ряде офиолитовых массивов (это, например, Войкаро-Сыншинский массив на Полярном Урале (Савельева и др., 2013; и др.) и офиолит Семейл в Омане (Pallister, Knight, 1981)). К сожалению, авторам настоящей работы не удалось отыскать в опубликованной литературе полных данных о составе габброидов из таких жил. Единственный неполный, но все-таки более или менее пригодный для использования анализ редкоземельных элементов в жильных габбро, залегающих среди перидотитов офиолита Семейл (Pallister, Knight, 1981), показывает, что по содержанию и характеру распределения РЗЭ (см. рис. 3) эта порода в общих чертах близка габброидам Алапаевского массива. Их общей особенностью является более низкое, по сравнению с габброидами коровой части офиолитового разреза, содержание элементов легкой части спектра ((La/Yb)_n составляет 0.16–0.40 в габбро Алапаевского массива и 0.46 в жильном габбро офиолита Семейл), что является весомым аргументом в пользу вывода о принадлежности изученных габбро к мантийной части офиолитового разреза.

Изложенные материалы, по мнению авторов, позволяют считать, что присутствие габброидов в составе мантийной части офиолитов (ультрабазитовый комплекс) не ограничивается маломощными жилами и дайками. На примере Алапаевского массива видно, что в некоторых случаях они могут слагать и достаточно крупные интрузии. Ввиду необычности наблюдаемой здесь геологической ситуации будет интересным рассмотреть возможную причину формирования крупных масс габбро в мантийной части офиолита. Очевидно, что оно не могло произойти в мантийных условиях, поскольку кристаллизация габбро на глубинах мантии невозможна (Рингвуд, 1981; и мн. др.). Это означает, что внедрение интрузии габбро было связано с процессом формирования офиолитовой ассоциации в надсубдукционных (преддуговых) условиях.

Наиболее популярной тектонической моделью формирования надсубдукционных офиолитов в настоящее время считается модель Р. Штерна и С. Блумера (Stern, Bloomer, 1992; Shervais, 2001; и др.), согласно которой они являются результатом спрединга над зарождающимися зонами субдукции (рис. 6). В соответствии с этой моделью, с начальной стадией формирования таких офиолитовых ассоциаций связано образование расслоенных габбро, некоторых изотропных габбро плу-

тонического разреза, большей части комплекса параллельных даек и нижних вулканических комплексов. Все перечисленные образования характеризуются слабым обогащением крупнокатионными элементами (LILE) по сравнению с N-MORB (что, по-видимому, является результатом влияния потока флюидов из субдуцирующей пластины) и обеднением высокочargedными элементами (HFSE). Позднее происходит формирование основных и ультраосновных пород, которые интродуцированы в более древний плутонический разрез, а также вулканических толщ, которые лежат на вулканитах ранней стадии, и, отчасти, на дайковом комплексе.

Блоки пород офиолитовой ассоциации, присутствующие в пределах Восточной зоны Среднего Урала, содержат фрагменты как расслоенных, так и однородных габбро, которые по геохимическим особенностям (см. рис. 4) соответствуют породам ранней стадии формирования надсубдукционных офиолитов, характеризующимся повышенными, по сравнению с N-MORB, содержаниями LILE и более низкими содержаниями HFSE (Shervais, 2001). Однако интрузий верлитов, пироксенитов или примитивных габбро, которые, согласно этой модели, должны залегать среди габброидов (Shervais, 2001), в пределах таких блоков не обнаружено. Отмеченная особенность, по-видимому, объясняется тем, что рассматриваемая зона субдукции не прошла полный цикл развития. По какой-то причине ее существование завершилось после формирования разреза, включающего расслоенные и изотропные габбро, а также комплекс параллельных долеритовых даек, фрагменты которых наблюдаются сейчас в пределах Восточной зоны Среднего Урала. В этом случае получает удовлетворительное объяснение и образование рассматриваемых в настоящей работе бедных всеми литофильными редкими элементами габброидов, залегающих в мантийной части офиолита. Очевидно, что с остановкой процесса субдукции и связанного с ней преддугового спрединга прекращается подток флюида в область плавления мантийного субстрата. Это вызывает обеднение редкими элементами образующихся базитовых расплавов и кристаллизующихся из них пород. Возникающие в это время условия сжатия закрывают каналы поступления образующихся расплавов в верхние горизонты формирующейся островодужной коры, что приводит к их кристаллизации на небольшом удалении от места генерации в мантийной части офиолитового разреза.

ВЫВОДЫ

1. Габброиды Алапаевского массива, слагающие крупное (длиной около 35 км) интрузивное тело среди мантийных ультрамафитов, по геохимическим особенностям заметно отличаются как от

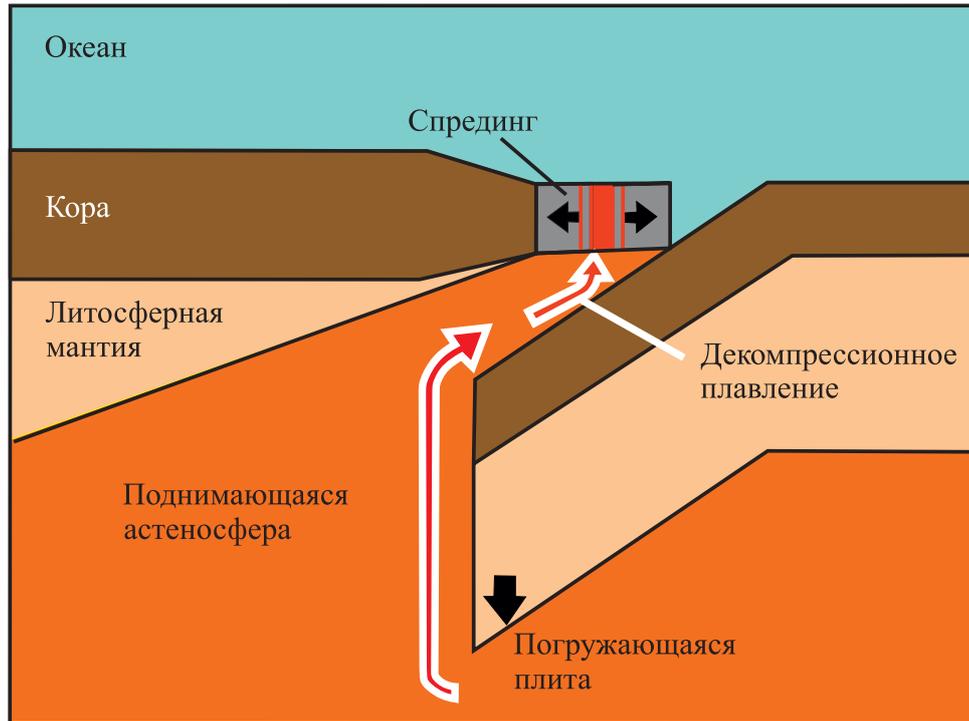


Рис. 6. Схематическая модель образования офиолитов при быстром растяжении верхней плиты над зарождающейся зоной субдукции в результате погружения нижней плиты литосферы (Stern, Bloomer, 1992).

Астеносферный источник MORB внедряется в клин под растягивающейся пластиной и подвергается воздействию флюидами из погружающейся пластины. Плавление происходит в результате декомпрессии литосферы и поступления водосодержащего флюида из слэба.

Fig. 6. Schematic model for ophiolite formation by rapid extension in the upper plate of a nascent subduction zone, in response to sinking of the lower plate lithosphere, after (Stern, Bloomer, 1992).

MORB-source asthenosphere flows into the wedge beneath the extending lithosphere and is fluxed with fluids from the sinking slab. Melting occurs in response to decompression of the lithosphere and the aqueous flux from the slab.

изотропных, так и расслоенных габбро коровой части офиолитового разреза, фрагменты которого наблюдаются в пределах Восточной зоны Среднего Урала. Фундаментальное различие заключается в значительно пониженном содержании в изученных породах легких РЗЭ, редких щелочей, бария, урана и тория, а также в отсутствии на спайдер-диаграмме максимумов Рb, свойственных габброидам коровой части офиолитовой ассоциации. Это позволяет заключить, что присутствующая в составе Алапаевского массива достаточно крупная интрузия габбро является аналогом мелких жил и даек базитов, наблюдаемых среди мантийных перидотитов в ряде офиолитовых массивов, таких как Войкаро-Сыннинский массив на Полярном Урале и офиолит Семейл в Омани.

2. Особенности распределения редких элементов на спайдер-диаграммах габброидов Алапаевского массива, общие для всех габброидов офиолитовой ассоциации востока Среднего Урала: наличие максимумов Sr и Ba и минимумов Nd и Th,

а также гарцбургитовый состав мантийного рести-та, вмещающего рассматриваемое габбровое тело, свидетельствуют о том, что формирование вендской офиолитовой ассоциации Восточной зоны Среднего Урала происходило в надсубдукционной (преддуговой) обстановке.

3. Причина формирования достаточно крупных масс габбро в мантийной части офиолита, по-видимому, заключается в том, что зона субдукции, с функционированием которой было связано формирование вендской офиолитовой ассоциации востока Среднего Урала, не прошла полный цикл развития. По какой-то причине ее существование завершилось на относительно ранней стадии формирования. С прекращением процесса субдукции условия растяжения на стыке плит сменяются сжатием, в результате чего прекращается подток флюида в область плавления мантийного субстрата и закрываются каналы поступления образующихся расплавов в верхние горизонты формирующейся островодужной коры, что вызывает обе-

днение редкими элементами образующихся базитовых расплавов и их кристаллизацию на небольшом удалении от места генерации в мантийной части офиолитового разреза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Волынец О.Н., Антипин В.С., Перепелов А.Б., Аношин Г.Н. (1990) Геохимия вулканических серий островодужной системы в приложении к геодинамике (Камчатка). *Геология и геофизика*, (5), 3-13.
- Лобова Е.В. (2013) Силурийский интрузивный магматизм Восточной зоны Среднего Урала. Автореф. Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. СПб.: Национ. минер.-сырьевой ун-т "Горный", 20 с.
- Петров Г.А., Ронкин Ю.Л., Маслов А.В., Лепихина О.П. (2010) Вендский и силурийский этапы офиолитообразования на восточном склоне Среднего Урала. *Докл. АН*, **432**(2), 220-226.
- Рингвуд А.Е. (1981) Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра, 584 с.
- Ронкин Ю.Л., Карасева Т.В., Маслов А.В. (2021) Первые ^{147}Sm - ^{143}Nd -данные для пород, представляющих интервал 6925.2–8250 м сверхглубокой скважины СГ-7 (Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция). *Докл. АН*, **496**(2), 130-134.
- Савельева Г.Н., Батанова В.Г., Бережная Н.А., Пресняков С.Л., Соболев А.В., Скублов С.Г., Белоусов И.А. (2013) Полихронное формирование мантийных комплексов офиолитов (Полярный Урал). *Геотектоника*, (3), 43-57.
- Симонов В.А., Смирнов В.Н., Иванов К.С., Ковязин С.В. (2008) Расплавные включения в хромшпинелидах расслоенной части Ключевского габбро-гипербазитового массива. *Литосфера*, (2), 101-115.
- Смирнов В.Н., Иванов К.С. (2019) Структурные связи Урала и Западной Сибири: единый этап формирования на границе перми и триаса. *Докл. АН*, **488**(3), 65-68. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524883294-297>
- Смирнов В.Н., Иванов К.С., Коротеев В.А., Ерохин Ю.В., Хиллер В.В. (2016) U–Pb-датирование и изучение состава включений в цирконах из офиолитовых габбро из Ключевского массива (Средний Урал): результаты и геологическая интерпретация. *Докл. АН*, **468**(5), 556-561.
- Смирнов В.Н., Иванов К.С., Травин А.В. (2019) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -возраст деформаций пород в Баженовской шовной зоне (восточная окраина Среднего Урала). *Литосфера*, **19**(2), 242-249. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-2-242-249>
- Смирнов В.Н., Казаков И.И., Пономарев В.С., Ронкин Ю.Л., Стороженко Е.В. (2021) Быстринский габбровый массив: первые данные о составе, возрасте и формационной принадлежности. *Литосфера*, **21**(1), 55-69. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-1-55-69>
- Смирнов В.Н., Ферштатер Г.Б., Иванов К.С. (2003) Схема тектоно-магматического районирования территории восточного склона Среднего Урала. *Литосфера*, (2), 45-56.
- Ферштатер Г.Б. (1987) Петрология главных интрузивных ассоциаций. М.: Наука, 231 с.
- Coleman R.G. (1977) Ophiolites: Ancient Oceanic Lithosphere? Berlin/Heidelberg: Springer, 229 p.
- Dilek Y., Furnes H. (2011) Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **123**, 387-411. <https://doi.org/10.1130/B30446.1>
- Ishizuka O., Hickey-Vargas R., Arculus R.J., Yagodzinski G.M., Savov I.P., Kusano Y., McCarthy A., Brandl P.A., Sudo M. (2018) Age of Izu–Bonin–Mariana arc basement. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **481**, 80-90.
- Holm P.E. (1985) The geochemical fingerprints of different tectonomagmatic environments using hydromagmatophile element abundances of toleitic basalts and basaltic andesites. *Chem. Geol.*, **51**, 303-323.
- Ludwig K.R. (2003) User's manual for Isoplot 3.0: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. *Special publication/Berkeley Geochronology Center*, No. 4. 77 p.
- McIntyre G.A., Brooks C., Compston W., Turek A. (1966) The statistical assessment of Rb-Sr isochrones. *J. Geophys. Res.*, **71**, 5459-5468.
- McDonough W.F., Sun S.-S. (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*, **120**, 223-253.
- Pallister J.S., Knight R.J. (1981) Rare-earth element geochemistry of the Samail Ophiolite near Ibra, Oman. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **86**, 2673-2697. <https://doi.org/10.1029/jb086ib04p02673>
- Shervais J.W. (2001) Birth, death, and resurrection: The life cycle of suprasubduction zone ophiolites. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2000GC000080.
- Smirnov V.N., Ivanov K.S., Ronkin Y.L., Erokhin Y.V. (2022) Results of ^{147}Sm – ^{143}Nd (ID-TIMS) and U–Pb (SHRIMP-II) Dating of Rocks and Minerals of the Chromite-Bearing Kluchevskoy Ophiolite Massif (the Eastern Segment of the Urals) and Their Geological Interpretation. *Minerals*, **12**, 1369.
- Stern R.J., Bloomer S.H. (1992) Subduction zone infancy: Examples from the Eocene Izu-Bonin-Mariana and Jurassic California arcs, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **104**(12), 1621-1636.
- Sun S.-S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes (Eds A.D. Saunders, M.J. Norry) *Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. Spec. Publ. Lond.*, **42**, 313-345.

REFERENCES

- and min. sci. diss. St-Peterburg, National mineral resource u mining university "Mining", 20 p. (In Russ.)
- Ludwig K.R. (2003) User's manual for Isoplot 3.0: a geochronological toolkit for Microsoft Excel. *Special publication/Berkeley Geochronology Center*, No. 4. 77 p.
- McDonough W.F., Sun S.-S. (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*, **120**, 223-253.
- McIntyre G.A., Brooks C., Compston W., Turek A. (1966) The statistical assessment of Rb-Sr isochrones. *J. Geophys. Res.*, **71**, 5459-5468.
- Pallister J.S., Knight R.J. (1981) Rare-earth element geochemistry of the Samail Ophiolite near Ibra, Oman. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **86**, 2673-2697. <https://doi.org/10.1029/jb086ib04p02673>
- Petrov G.A., Ronkin Yu.L., Maslov A.V., Lepikhina O.P. (2010) Vendian and Silurian ophiolite-formation stages on the eastern slope of the Middle Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **432**(1), 570-576. (In Russ.)
- Ringvud A.E. (1981) Composition and petrology of the earths mantle. Moscow, Nedra Publ., 584 p. (In Russ.)
- Ronkin Yu.L., Karaseva T.V., Maslov A.V. The First ¹⁴⁷Sm–¹⁴³Nd Data on Rocks from the 6925.2- to 8250-m Interval of the SG-7 Superdeep Borehole (West Siberian Oil-and-Gas Province). *Dokl. Earth Sci.*, **496**(2), 130-134 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **496**(2), 130-134).
- Savelieva G.N., Batanova V.G., Sobolev A.V., Belousov N.A., Skublov S.G. (2013) Polychronous formation of mantle complexes in ophiolites. *Geotectonics*, **47**(3), 167-179 (translated from *Geotektonika*, (3), 43-57).
- Shervais J.W. (2001) Birth, death, and resurrection: The life cycle of suprasubduction zone ophiolites. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2000GC000080.
- Simonov V.A., Smirnov V.N., Ivanov K.S., Kovyasin S.V. (2008) Melt inclusions in chrome-spinel of Kluchevsk gabbro-ultrabasite massif's stratiform part. *Lithosphere*, (2), 101-115. (In Russ.)
- Smirnov V.N., Fershtater G.B., Ivanov K.S. (2003) Sheme of tectonomagmatic zoning of the Middle Urals. *Litosfera*, (2), 45-56. (In Russ.)
- Smirnov V.N., Ivanov K.S. (2019) Structural links between the Urals and Western Siberia: a single stage of formation at the border of the Permian and Triassic. *Dokl. Akad. Nauk*, **488**(3), 65-68. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869-56524883294-297>.
- Smirnov V.N., Ivanov K.S., Koroteev V.A., Erokhin Y.V., Khiller V.V. (2016) U–Pb dating and composition of inclusion in zircon from ophiolitic gabbro of the Kluchevsk massif (Middle Urals): results and geological interpretation. *Dokl. Earth Sci.*, **468**(2), 574-579 (translated from *Dokl. Akad. Nauk*, **468**(5), 556-561).
- Smirnov V.N., Ivanov K.S., Ronkin Y.L., Erokhin Y.V. (2022) Results of ¹⁴⁷Sm–¹⁴³Nd (ID-TIMS) and U–Pb (SHRIMP-II) Dating of Rocks and Minerals of the Chromite-Bearing Kluchevskoy Ophiolite Massif (the Eastern Segment of the Urals) and Their Geological Interpretation. *Minerals*, **12**, 1369.
- Smirnov V.N., Ivanov K.S., Travin A.V. (2019) ⁴⁰Ar/³⁹Ar age of deformations in Bazgenovo suture zone (Eastern boundary of the Middle Urals). *Lithosphere (Russia)*, **19**(2), 242-249. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-2-242-249>
- Smirnov V.N., Kazakov I.I., Ponomarev V.S., Ronkin Y.L., Storozhenko E.V. (2021) The Bystrinskii gabbro massif: the first data concerning composition, age and formation affiliation. *Lithosphere*, **21**(1), 55-69. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-1-55-69>
- Stern R.J., Bloomer S.H. (1992) Subduction zone infancy: Examples from the Eocene Izu-Bonin-Mariana and Jurassic California arcs, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **104**(12), 1621-1636.
- Sun S.-S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes. (Eds A.D. Saunders, M.J. Norry). *Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. Spec. Publ. Lond.*, **42**, 313-345.
- Volynets O.N., Antipin V.S., Perepelov A.V., Anoshin G.N. (1990) Geochemistry of volcanic series of island arc system in terms of geodynamics (Kamchatka). *Geol. Geophys.*, (5), 3-13.