

Научная статья
УДК 552.31; 550.4
doi: 10.17223/25421379/37/4



ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ПОРОД ОФИОЛИТОВОЙ АССОЦИАЦИИ СЕВЕРНОГО СКЛОНА КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ

Надежда Александровна Дугарова¹, Игорь Федорович Гертнер², Татьяна Семеновна Краснова³

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

¹ nadyadugarova@mail.ru

² labspm@ggf.tsu.ru

³ science@mail.tsu.ru

Аннотация. Представлены результаты геохимических и изотопно-геохронологических исследований как ультрамафитов, так и мафитов офиолитовой ассоциации гор Северная, Зеленая, Бархатная и Семеновского массива (Кузнецкий Алатау). Содержания петрогенных элементов измерены методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF, энергодисперсионный спектрометр Oxford ED2000). Концентрации редких и редкоземельных элементов установлены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS, масс-спектрометр высокого разрешения Agilent 7500cx). Изотопные составы Sm-Nd и Rb-Sr получены на масс-спектрометрах Finnigan MAT-262 (RPQ) и МИ-1201-Т. По особенностям вещественного состава ультрамафиты и мафиты подразделяются на две петрогенетические ассоциации: дунит-гарцбургитовая реститового происхождения и магматогенная, сформировавшаяся в процессе внутрикамерной дифференциации. Как и для большинства офиолитов, исследуемые породы характеризуются общим увеличением концентрации редкоземельных элементов по мере продвижения вверх по разрезу океанической коры. Все породы избирательно обогащены Cs, Ba, Sr, ± Sm и обеднены Rb, Ta, Nb, Hf, Zr, что, вероятно, вызвано изменением состава вещества мантийного источника островодужной базальтовой магмы за счет привноса «субдукционной компоненты». Мафитовые породы по уровню концентрации большинства элементов превосходят базальты срединно-океанических хребтов, что указывает на вероятный задуговый режим их формирования. Это также подтверждается на дискриминационных диаграммах для определения геодинамических обстановок. Полученные Sm-Nd возрасты (942 ± 53 и 960 ± 75 млн лет) ультрамафитовых и мафитовых пород свидетельствуют о более древнем возрасте офиолитов севера Кузнецкого Алатау. Более молодые возраста ~ 700 и 370 млн лет, полученные для метагаббродов, вероятно, отвечают возрасту метаморфических и метасоматических изменений мафитовых пород. По неопровержимым характеристикам реститовые ультрамафиты соответствуют параметрам деплетированной мантии, но с отчетливым обогащением коровым Sr. Для пород магматогенного происхождения также характерен разброс изотопных отношений Sr и Nd, что в комплексе с особенностями поведения Th, Nb, La, Ce указывает на взаимодействие с материалом верхней коры. Таким образом, наблюдается явное взаимодействие мантийной и коровой составляющих при формировании пород офиолитовой ассоциации северного склона Кузнецкого Алатау.

Ключевые слова: офиолитовая ассоциация, геохимия, изотопы Nd и Sr, петрогенезис, Кузнецкий Алатау

Источник финансирования: Изотопно-геохронологические исследования проведены при поддержке Программы развития Томского государственного университета («Приоритет 2030», 2.0.7.25 ИГ). Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2025-0015).

Для цитирования: Дугарова Н.А., Гертнер И.Ф., Краснова Т.С. Изотопно-геохимическая неоднородность пород офиолитовой ассоциации северного склона Кузнецкого Алатау // Геосферные исследования. 2025. № 4. С. 52–68. doi: 10.17223/25421379/37/4

Original article
doi: 10.17223/25421379/37/4

ISOTOPIC-GEOCHEMICAL HETEROGENEITY OF ROCKS OF THE OPHIOLITE ASSOCIATION FROM THE NORTHERN SLOPE OF KUZNETSK ALATAU

Nadezhda A. Dugarova¹, Igor F. Gertner², Tatyana S. Krasnova³

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

¹ nadyadugarova@mail.ru

² labspm@ggf.tsu.ru

³ science@mail.tsu.ru

Abstract. Ophiolites from the northern slope of the Kuznetsk Alatau Ridge (SW Siberia) are the most typical fragments of suboceanic crust, which are part of the Vendian–Early Cambrian crust of the Paleo-Asian Ocean. This work presents the results of geochemical and isotope-geochronological studies of ultramafic and mafic rocks from ophiolite associations of the Severnaya,

Zelenaya, Barkhatnaya mountains and Semenovskiy massif. The contents of petrogenic oxides and trace elements were measured by X-ray fluorescence on instrument OXFORD ED-2000 and ICP-MS (high-resolution mass spectrometer Agilent 7500cx) respectively. The isotopic composition of Sm–Nd and Rb–Sr were obtained using Finnigan MAT-262 (RPQ) and MI-1201–T mass spectrometers. According to the features of their material composition, ultramafics and mafics are divided into two petrogenetic associations: dunite-harzburgite of restitic origin and magmatogenic, formed in the process of intra-chamber differentiation (ultramafics → pyroxenites → gabbroids). As with most ophiolites, including MOR-type fragments, the studied rocks are characterized by a general increase in the concentration of rare earth elements as one moves upward along the section of the oceanic crust. All rocks are selectively enriched in Cs, Ba, Sr, ± Sm and do not have elevated concentrations of Rb, Ta, Nb, Hf, Zr, which is caused by a change in the composition of the substance of the mantle source of island-arc basaltic magma due to the introduction of a “subduction component”. Mafic rocks exceed mid-ocean ridge basalts in the concentrations of most elements, indicating a likely back-arc formation regime. This is also confirmed by discriminatory diagrams used to determine geodynamic settings. The obtained Sm–Nd age (942 ± 53 and 960 ± 75 Ma) of ultramafic and mafic rocks suggests an older age of ophiolites from the north of the Kuznetsk Alatau. They represent fragments of oceanic crust of the MOR and SSZ type, corresponding to the early stages of the opening of the Paleoasian Ocean. The younger ages of ~700 and 370 Ma obtained for the metagabbroids probably correspond to the age of metamorphic and metasomatic transformations of mafic rocks. The isotopic signatures of Sr and Nd, also behaviour of some elements, such as Th, Nb, La, Ce, demonstrate a contamination of the depleted source by crustal material, or indicate the participation of a subduction component in the formation of studied ophiolites.

Keywords: ophiolite association, geochemistry, Nd and Rb isotopes, petrogenesis, Kuznetsk Alatau

Source of financing: Isotopic-geochronological study was supported by the Tomsk State University Development Program (Priority 2030, 2.0.7.25 IG). The research was carried out within the framework of the State assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSWM-2025-0015).

For citation: Dugarova N.A., Gertner I. F., Krasnova T.S. (2025) Isotopic-geochemical heterogeneity of rocks of the ophiolite association from the northern slope of Kuznetsk Alatau. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 52–68. doi: 10.17223/25421379/37/4

Введение

Ультрамафит-мафитовые комплексы в складчатых областях современных континентов образуют протяженные линейные зоны и рассматриваются в качестве сутурных швов между субконтинентальными террейнами [Колман, 1979; Магматические..., 1985, 1988; Nicolas, 1989]. По мнению многих исследователей, в пределах Центрально-Азиатского складчатого пояса такие зоны отвечают обдуцированным литосферным фрагментам Палеоазиатского океана [Берзин и др., 1994; Берзин, Кунгурцев, 1996; Казанский и др., 2003; Добрецов и др., 2005].

Для его геотектонической реконструкции наиболее важными и дискуссионными являются возраст и источники вещества ювенильной земной коры. По результатам палеомагнитных и геохронологических исследований известные офиолитовые ассоциации Кузнецкого Алатау, Горного Алтая и Западного Саяна входят в состав единого островодужного сегмента венд-раннекембрийской коры Палеоазиатского океана [Берзин, Кунгурцев, 1996; Добрецов и др., 2005; Metelkin et al., 2011]. Изотопные возрасты были определены по метабазитам (Sm–Nd, минералы и валовые составы) и плагиориолитам и плагиогранитам (U–Pb, циркон) в интервале 700–540 млн лет [Владимиров и др., 1999; Плотников и др., 2000]. Нами получены новые данные по Sm–Nd и Rb–Sr изотопным анализам породообразующих минералов и валовых составов собственно ультрамафитов и мафитов в одном из эта-

лонных фрагментов офиолитовой ассоциации северного склона Кузнецкого Алатау в районе гор Северной, Зеленой, Бархатной и Семеновского массива. Также в настоящей работе обобщены новые и уже опубликованные геохимические данные по изучаемым породам. Результаты исследований позволяют оценить и уточнить возраст формирования и источники вещества фрагментов океанической коры на примере офиолитов северного склона Кузнецкого Алатау.

Геологическое строение

Алтае-Саянская складчатая область является южным обрамлением более древней Сибирской платформы и входит в состав Центрально-Азиатского складчатого пояса (рис. 1, а). Алтае-Саянская складчатая область включает складчатые сооружения различного геологического возраста: байкальские, каледонские, герцинские и киммерийские [Кузнецов, 1954; Мусатов, Тарков, 1959]. Кузнецкий Алатау, являясь одной из древних структур региона, рассматривается в качестве каледонской коллизионной системы и состоит из следующих палеотектонических ансамблей (снизу вверх): а) фрагментов позднепротерозойской субокеанической коры; б) ранне-среднекембрийских островодужных комплексов; в) позднекембрийских – раннеордовикских континентально-окраинных и сопутствующих им раннепалеозойских рифтогенных или внутриплитных формаций [Алабин, 1983; Берзин, Кунгурцев, 1996; Краснова и др., 2001; Гринев, 2007].

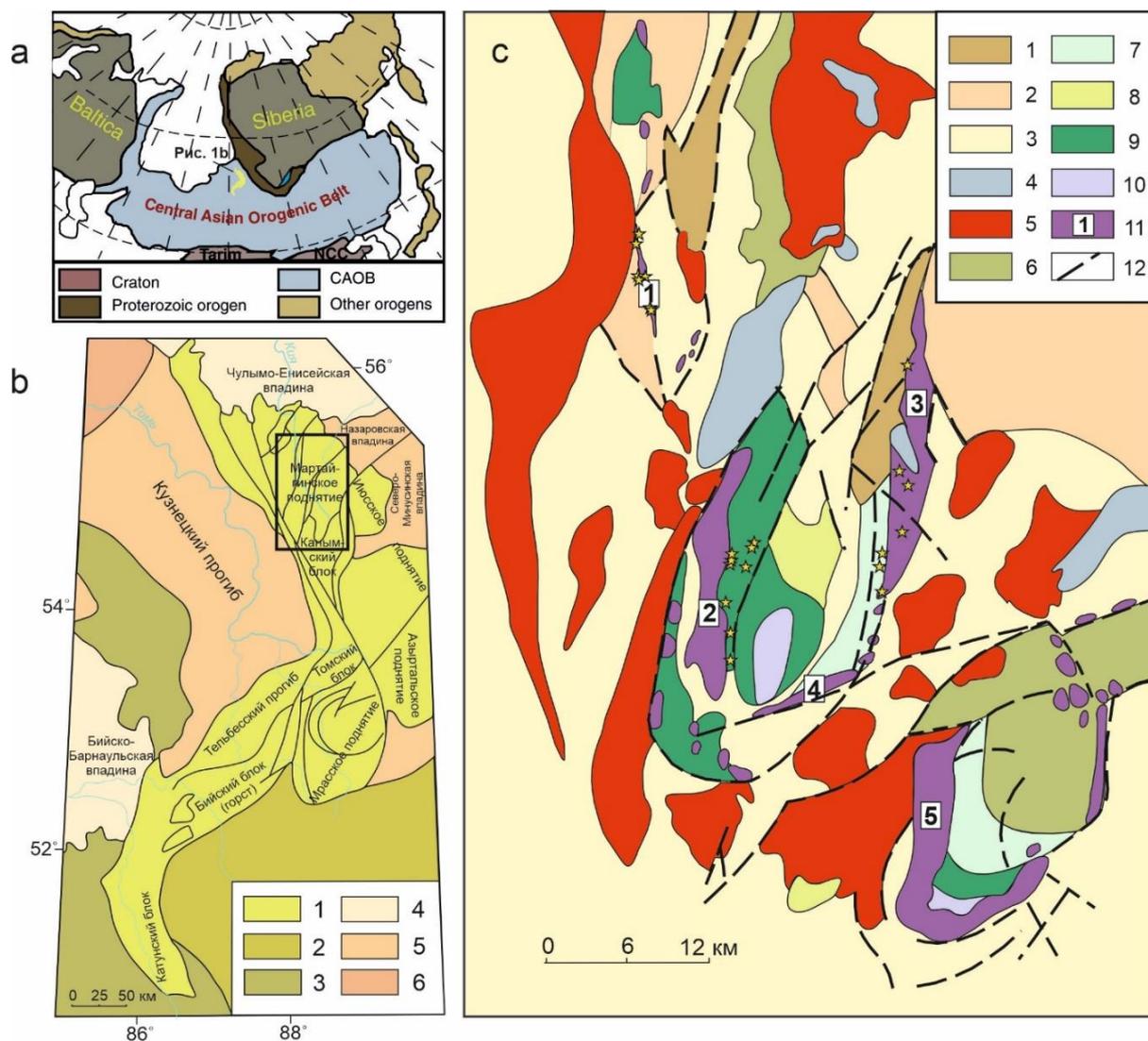


Рис. 1. а – расположение Центрально-Азиатского складчатого пояса [Xiao and Santosh, 2014]; б – геолого-структурная схема Кузнецкого Алатау (составлена по [Шокальский и др., 2000]); в – схема внутреннего строения офиолитовых парагенезов северо-восточного склона Кузнецкого Алатау (составлена по [Коновалова, Прусевич, 1977; Краснова, 2005])

б – 1–3 – складчатые системы Алтае-Саянской складчатой области: 1 – Кузнецко-Алтайская, 2 – Саяно-Тувинская, 3 – Салаир-Горноалтайская; 4 – мезозойско-кайнозойские впадины; 5 – крупные наложенные средне-позднепалеозойские структуры; 6 – Кольвань-Томская складчатая зона; в – структурно-вещественные комплексы обрамления: 1 – субконтинентальные вулканогенно-терригенные отложения (D); 2 – островодужные карбонатно-вулканогенные отложения E_1 - E_2 ; 3 – субокеанические карбонатные и терригенные осадки R- E_1 . Интрузивные массивы: 4 – субщелочных габброидов; 5 – гранитоидов. Вещественные комплексы офиолитовой ассоциации: 6 – базальтовый; 7 – габбро-диабазовый; 8 – габбродиоритовый; 9 – габбровый; 10 – габбро-пироксенитовый; 11 – ультрамафитовые массивы (1 – Семеновский, 2 – гор Северной и Зеленой, 3 – Бархатный, 4 – г. Заячьей, 5 – Среднетерсинский); 12 – тектонические нарушения. Звездами обозначены места отбора образцов

Fig. 1. a – Location of the Central Asian Orogenic Belt after [Xiao and Santosh, 2014]; б – Geological-structural scheme of the Kuznetsk Alatau ridge (according to [Shokal'skii et al., 2000]); в – Scheme of the internal structure of ophiolite parageneses from NE slope of the Kuznetsk Alatau ridge (according to [Konovalova, Prusevich, 1977; Krasnova, 2005])

б – 1–3 – fold systems of the Altai-Sayan folded region: 1 – Kuznetsko-Altayskaya, 2 – Sayano-Tuvinskaya, 3 – Salair-Gornoaltayskaya; 4 – Mesozoic-Cenozoic depressions; 5 – large superimposed Middle-Late Paleozoic structures; 6 – Kolyvan-Tomsk folded zone; в – Structural-compositional complexes of framing: 1 – subcontinental volcanic-terrigenous formation (D); 2 – carbonate-volcanic formation of island arc units (E_1 - E_2); 3 – carbonate and terrigenous formations of suboceanic units (R- E_1). Intrusive massifs: 4 – subalkaline gabbroic intrusions; 5 – granitic intrusions. Ophiolitic units: 6 – basaltic; 7 – gabbro-dioritic; 8 – gabbro-dioritic; 9 – gabbroic; 10 – gabbro-pyroxenites; 11 – ultramafic massifs (1 – Semenovskiy, 2 – Severnaya and Zelenaya, 3 – Barkhatny, 4 – Zayach'ya, 5 – Srednetersinsky); 12 – faults. The sample locations are marked with asterisks

В структурном плане Кузнецкий Алатау характеризуется достаточно выраженным коленообразным изгибом, имея на юге север-северо-восточное, а на севере – северо-западное простирание (рис. 1, *b*). Блоковое строение региона выражается в обособлении большого количества структурно-формационных зон и подзон, а также в развитии тектонических нарушений северо-западного, северо-восточного и субмеридионального простирания [Пинус и др., 1958; Коновалова, Прусевич, 1977; Добрецов, Буслов, 2007]. Тектогенез сопровождался активной магматической деятельностью с образованием комплексов повышенной щелочности [Гринев, 1990; Берзин, Кунгурцев, 1996; Войтенко 2007; Мустафаев, 2022] и воздействием мантийных плюмов [Врублевский, Гертнер, 202; Врублевский, 2022].

Фрагменты субокеанической коры сложены типичным для офиолитового разреза набором петрографических разновидностей и локализованы в осевой части Кузнецкого Алатау [Монич, 1941; Коновалова, Прусевич, 1977; Гончаренко, 1982; Уткин, 1990; Симонов, 1993; Ступаков, Симонов, 1997; Симонов и др., 1999; Краснова и др., 2001; Симонов, 2024]. В состав офиолитов входят бархатный дунит-гарцбургитовый комплекс, ультрамафит-мафитовые массивы московкинского и усинского габброидных комплексов, габбро-диорит-долеритовые интрузивы кундустуюльского «дайкового» комплекса, эффузивы и осадки усть-анзасской и колтасской свит [Шокальский и др., 2000]. В регионе выделяются два возрастных уровня офиолитогенеза – позднерифейско-ранневендский и поздневендско-раннекембрийский [Плотников и др., 2000]. К последнему относятся ультрамафит-мафитовые парагенезы Среднетерсинского массива, гор Северной, Зеленой и Бархатной. Степень их тектонической переработки закономерно увеличивается в направлении с юго-востока на северо-запад (рис. 1, *c*) [Краснова, 2005].

Офиолитовая ассоциация гор Северная, Зеленая и Бархатная на северном склоне Кузнецкого Алатау имеет полукольцевое зональное строение, которое обусловлено многостадийными процессами эксгумации и тектоническими движениями надвигового, взбросового и сдвигового типов. Наиболее крупные фрагменты дунит-гарцбургитового комплекса слагают краевые ветви, а внутренняя часть выполнена породами основного состава [Коновалова, Прусевич, 1977; Краснова, 2005]. Замковая часть ассоциации представляет собой зону серпентинитового меланжа (г. Заячья), включающую отдельные блоки гарцбургитов и габброидов (рис. 1, *c*). По петрографическому составу ультрамафитовые породы представлены дунитами, гарцбургитами, их серпентинизированными разновидностями, а также хромититами. Они приурочены к осевой части массивов и прослеживаются вдоль

удлинения. Вдоль контактов массивов и рассекающих их тектонических нарушений породы интенсивно подвержены метасоматической переработке, наиболее распространенные из них серпентинизация, карбонатизация, оталькование и лиственитизация. Практически все породы обнаруживают признаки пластического течения и рекристаллизации, что указывает на их принадлежность к метаморфическому комплексу офиолитов [Колман, 1979; Гончаренко, 1989; Краснова, 2005]. Основные породы представлены широким спектром – от габбро-перидотитов и пироксенитов до лейкогабброидов и диоритов. Характерной чертой этих пород является наличие признаков наложенных метаморфических изменений в два этапа. Первый соответствует прогрессивному пику $T = 500\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 2\text{--}6$ кбар (эпидот-амфиболитовая фация), а параметры регрессивного этапа характеризуются $T = 350\text{--}510\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 2\text{--}9$ кбар [Дугарова и др., 2017]. Наиболее крупнозернистые разновидности наблюдаются на восточном склоне гор Северная и Зеленая и представлены габброидами разной меланократовости с признаками дифференциации и полосчатых текстур. Гипабиссальные образования здесь имеют подчиненное распространение, локализуясь преимущественно среди габброидов и терригенно-карбонатных отложений. На западном склоне г. Бархатной преобладают разности гипабиссального облика, представленные достаточно однородными мелко- и среднезернистыми габбро, габбро-диабазами, пронизанными многочисленными дайковыми и жильными телами микрогаббро, микрогаббродиоритов и реже дацитовых порфиров [Краснова, 2005].

Семеновский массив входит в состав Кундустуюль-Семеновской мафит-ультрамафитовой ассоциации, которая выделена на основе тесной пространственной связи и взаимопереходов ультраосновных и габбровых пород, их довольно близкого состава и текстурно-структурных особенностей [Коновалова, Прусевич, 1977]. В массивах этой зоны помимо Семеновского массива выделяются кундустуюльские тела пироксенитов и серпентинитов, берчикульские тела перидотитов и большое количество жил и линз серпентинитов. Семеновский массив расположен на водоразделе рек Талановой и Горелой (рис. 1, *c*). Дайко- и линзообразные тела перидотитов и серпентинитов вытянуты в субмеридиональном направлении и прослеживаются в виде цепочки. Они локализируются вдоль тектонического контакта, проходящего между породами нижнекембрийского и протерозойского возраста. В сочетании с ультрамафитами находятся мелкие тела метагабброидов, диоритов, диорит-диабазов и альбититов [Коновалова, Прусевич, 1977], которые наиболее интенсивно подвержены тектонической переработке и вторичному изменению.

Методы исследования

Содержания петрогенных элементов измерены методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF, энергодисперсионный спектрометр Oxford ED2000). Концентрации редких и редкоземельных элементов установлены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS, масс-спектрометр высокого разрешения Agilent 7500cx). Исследования выполнены на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета.

Изотопный состав Sm-Nd и Rb-Sr изучен по стандартной методике [Баянова, 2004] на масс-спектрометрах Finnigan MAT-262 (RPQ) и МИ-1201-Т в Геологическом институте КНЦ РАН, г. Апатиты. Величина эпсилон (ϵ) и первичные изотопные отношения неодима и стронция рассчитаны по современным параметрам модельных резервуаров CHUR ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512638$; $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,1967$) и UR ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7045$; $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0,0816$). Модельный возраст $T_{\text{Nd}}(\text{DM})$ рассчитан с учетом современного состава деплетированной мантии: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,51315$; $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,2137$ [Фоп, 1989]. Вычисление и построение параметров изохрон проводилось с помощью программного комплекса ISOPLOT/Ex [Ludwig, 2008].

Результаты исследований и обсуждение

Вещественный состав пород. По особенностям вещественного состава ультрамафиты и мафиты подразделяются на две петрогенетические ассоциации: дунит-гарцбургитовая реститового происхождения и магматогенная, сформировавшаяся в процессе внутрикамерной дифференциации (ультрамафиты \rightarrow пироксениты \rightarrow габброиды) [Краснова, 2005]. Для геохимических и изотопно-геохронологических исследований были отобраны образцы как ультрамафитов, так и мафитов гор Северная и Зеленая, Бархатного и Семеновского массивов.

Дунит-гарцбургитовая ассоциация является наибольшей по объему и объединяет низкокремнистые низкожелезистые высокомагнезиальные ультрамафиты. Гарцбургиты представлены крупно-, средне- и мелкозернистыми породами с содержанием оливина от 65 до 90 % и ортопироксена от 10 до 30 %. В незначительном количестве (до 3–5 %) постоянно присутствует хромшпинелид. Дуниты массивные мелко- или среднезернистые, состоящие из оливина на 95–98 %. Их структура весьма разнообразная – от панидиоморфнозернистой до гетерогранобластической. Отмечаются единичные зерна ортопироксена и хромшпинелиды до 4–5 %.

Кумулятивные ультрамафиты представлены перидотитом, верлитом и плагиовестеритом [Краснова, 2005]. В перидотитах отмечается равное содержание оливина и ортопироксена, они наиболее широко распространены в пределах массива гор Северная и Зеленая. Верлит-пироксениты характеризуются относительно высоким содержанием $\text{SiO}_2 = 45\text{--}55\%$, обогащены кальцием ($\text{CaO} = 8\text{--}14\%$) и глиноземом ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 3\text{--}6\%$) и содержат заметное присутствие плагиоклаза и диоксида. Эти породы отмечаются среди габброидов, но тяготеют к экзоконтактам ультрамафитовых массивов.

Для габброидов характерна массивная текстура и габбровая, офитовая, порфириовидная структуры. Основными минералами являются плагиоклаз, моноклинный пироксен, роговая обманка и оливин. Степень и характер вторичных преобразований в образцах разные. Иногда в связи с метаморфизмом установление первичных структурных особенностей затруднительно. В амфиболитизированных разностях отмечаются полосчатые, гнейсовидные текстуры и наблюдаются отдельные зерна амфибола с зональным строением [Дугарова и др., 2017]. Мафиты умеренно и высокотитанистые низкомагнезиальные и распространены в верхних частях габброидного разреза и в составе комплекса параллельных даек [Коновалова, Прусевич, 1977; Краснова, 2005]. Породы с повышенной кремнекислотностью имеют локальное распространение на восточных склонах гор Северная и Зеленая. Они образуют небольшие обособления среди амфиболитизированных габброидов и рассматриваются в качестве конечных дифференциатов базитовых комплексов. По петрохимическим особенностям среди магматических производных офиолитового комплекса гор Северная, Зеленая и Бархатная и Семеновского массива устанавливаются продукты как океанических толеитовых (MORB), так и островодужных (типа ВАВВ) серий [Дугарова и др., 2023].

Распределение редкоземельных и рассеянных элементов в породах исследуемой офиолитовой ассоциации имеет следующие характеристики (табл. 1). В реститовых ультрамафитах спектры распределения РЗЭ характеризуются обогащением легкими лантаноидами и обеднением тяжелыми (рис. 2). Такая резкая дифференциация ($\text{La}/\text{Sm}_n = 1,3\text{--}7,8$; $\text{La}/\text{Yb}_n = 2,1\text{--}28,2$) свойственна реститовым ультрамафитам, которые формировались в обстановках вулканических островных дуг и задуговых бассейнов [Melcher et al., 2002].

Обогащение легкими РЗЭ, скорее всего, является следствием метасоматической проработки литосферной мантии над зоной субдукции в результате привноса воды и других летучих компонентов из подстилающих метаморфизованных блоков океанической

коры. А заметное обеднение тяжелыми РЗЭ, вероятно, обусловлено самим характером плавления ранее деплетированного мантийного субстрата [Шинкарев, Иванников, 1983; Rollinson, 1994].

В перидотитах, плагиоэбстеритах и верлитах, входящих в состав кумулятивного комплекса, кон-

центрации РЗЭ более значительны. В целом при общем положительном наклоне вариационных трендов, по степени фракционирования РЗЭ кумулятивные ультрамафиты ($La/Sm_n = 3-5,1$; $La/Yb_n = 3,5-7,1$) сопоставимы с деплетированными мантийными гипербазитами.

Таблица 1

Химический состав представительных проб пород офиолитовой ассоциации северного склона Кузнецкого Алатау

Table 1

Chemical composition of representative samples of rocks of an ophiolite association from the northern slope of the Kuznetsk Alatau

Компонент	Бархатный массив						Горы Северная и Зеленая						Семеновский массив						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
SiO ₂	50,7	50,41	44,96	–	–	41,63	62,12	50,72	48,45	38,11	55,25	49,96	–	40,1	47,95	49,25	40,52	51,2	52,65
TiO ₂	1,72	1,69	1,37	–	–	0,03	0,48	0,64	2,17	2,1	0,7	0,16	–	0,03	1,18	0,72	1,63	1,03	0,96
Al ₂ O ₃	14,78	15,87	16,35	–	–	1,61	16,04	17,72	12,12	16,04	16,7	4,43	–	0,46	14,83	14,80	12,84	10,46	11,47
FeO	11,86	11,74	–	–	–	–	3,09	8,07	11,78	16,81	7,69	10,74	–	–	–	н.о.	н.о.	–	–
Fe ₂ O ₃	1,85	1,65	11,74	–	–	9,07	1,48	1,94	2,71	1,92	1,46	1,64	–	7,56	11,19	13,86	17,11	14,67	15,69
MnO	0,1	0,21	0,21	–	–	0,13	0,08	0,15	0,24	0,2	0,17	0,15	–	0,12	0,18	0,22	0,29	0,24	0,25
MgO	5,5	5,25	7,61	–	–	40,55	3,06	5,2	5,93	7,56	5,04	19,14	–	42,37	8,95	8,18	9,08	5,91	6,27
CaO	9,14	9,35	9,46	–	–	0,65	6,06	9,4	10,57	9,95	6,77	9,15	–	0,12	10,02	5,23	14,29	7,43	5,04
Na ₂ O	4,11	3,25	4,23	–	–	0,34	4,47	3,71	2,54	1,06	3,6	0,19	–	0,34	2,19	3,95	0,73	4,75	4,48
K ₂ O	0,2	0,52	0,91	–	–	0,1	1,16	0,34	0,31	0,27	0,28	0,05	–	0,06	0,78	0,45	0,66	0,37	0,42
P ₂ O ₅	–	–	0,18	–	–	0,03	0,16	0,16	0,19	0,08	0,22	0,05	–	0,03	0,23	0,19	0,24	0,12	0,16
SO ₃	–	–	–	–	–	–	<0,1	0,13	0,65	1,77	<0,1	0	–	–	–	н.о.	н.о.	–	–
Cr ₂ O ₃	0,02	0,04	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	н.о.	н.о.	–	–
NiO	0,01	0,01	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	н.о.	н.о.	–	–
Ппп	–	–	2,63	–	–	6,16	1,08	0,84	1,2	4,51	1,7	3,04	–	–	2,72	3,53	2,97	4,05	2,85
Сумма	99,99	99,99	99,7	–	–	100,3	99,28	99,02	98,86	100,38	99,58	98,7	–	–	100,2	100,39	100,36	100,22	100,25
Ti	10028	88424	7608,5	300,2	102,5	35,12	7671,5	7432,4	127128	15295,1	4424,2	1198,3	8330,9	–	7212,5	6508,6	10363,8	9455,1	9488,9
Rb	1,32	8,68	8,21	1,81	0,31	1,01	9,27	15,56	3,01	2,031	3,41	1,27	6,57	–	9,94	3,30	7,27	4,31	6,48
Sr	165,37	175,82	781,02	29,80	17,56	7,51	551,83	355,73	168,48	235,62	546,88	78,65	992,65	–	401,05	172,57	1818,21	125,86	115,37
Y	44,58	29,91	21,65	2,59	0,24	0,19	10,03	27,48	43,52	2,72	12,56	2,17	28,51	–	20,13	21,95	39,14	36,36	39,16
Zr	86,96	98,92	125,83	15,55	2,59	1,20	91,4	72,72	100,74	5,03	69,06	10,84	40,8	–	86,69	69,24	76,13	86,46	104,11
Nb	1,68	2,39	11,05	2,65	0,46	1,98	9,82	1,37	3,67	0,32	4,78	0,67	2,38	–	5,16	1,73	2,55	1,91	2,34
Cs	0,08	0,24	0,18	0,20	0,01	0,05	0,18	0,82	0,09	0,05	0,23	0,14	0,13	–	0,16	0,05	0,14	0,30	0,30
Ba	59,66	113,8	350,75	14,49	8,63	6,98	181,2	158,4	32,27	41,91	239,3	26,91	457,6	–	163	128,13	310,96	110,50	146,78
La	4,76	6,37	19,77	1,97	0,90	0,43	66,63	4,9	5,13	0,84	14,75	2,01	24,19	–	10	5,76	4,54	3,05	4,65
Ce	14,68	18,05	42,66	3,04	1,35	0,90	92,42	14,51	15,41	2,18	25,22	3,83	51,69	–	24,46	15,92	13,22	9,85	14,21
Pr	2,72	2,88	5,18	0,30	0,15	0,10	8,88	2,15	2,65	0,34	3,25	0,44	7,86	–	3,3	2,35	2,22	1,67	2,19
Nd	13,46	14,58	21,49	1,07	0,44	0,35	29,27	10,69	14,26	1,96	10,47	1,82	35,96	–	15,04	11,63	12,00	9,34	11,40
Sm	3,66	4,38	4,59	0,25	0,08	0,05	4,04	3,34	4,89	0,58	1,87	0,42	7,87	–	3,85	3,40	4,30	3,58	4,10
Eu	1,63	1,48	1,57	0,09	0,03	0,01	1,2	1,26	1,71	0,37	0,96	0,15	2,7	–	1,29	1,27	1,26	1,27	1,32
Gd	4,98	4,87	4,58	0,30	0,07	0,04	3,62	3,92	6,17	0,66	2,11	0,44	6,44	–	3,96	3,75	5,53	4,76	5,26
Tb	0,82	0,85	0,72	0,06	0,01	0,01	0,45	0,65	1,14	0,10	0,28	0,07	1,01	–	0,63	0,64	1,06	0,93	1,02
Dy	6,65	5,45	4,43	0,40	0,03	0,03	2,31	3,91	7,78	0,62	1,85	0,39	5,18	–	3,95	4,22	7,27	6,54	7,06

Компонент	Бархатный массив						Горы Северная и Зеленая						Семеновский массив						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Ho	1,3	1,19	0,92	0,09	0,01	0,01	0,42	1,02	1,76	0,13	0,34	0,09	1,1	–	0,82	0,91	1,64	1,50	1,62
Er	3,5	3,33	2,57	0,28	0,03	0,02	1,13	2,75	4,99	0,32	0,97	0,24	2,5	–	2,23	2,51	4,60	4,28	4,67
Tm	0,64	0,5	0,38	0,05	0,00	0,00	0,15	0,36	0,74	0,04	0,16	0,03	0,37	–	0,33	0,38	0,70	0,67	0,72
Yb	3,29	3,13	2,40	0,27	0,02	0,02	0,91	2,7	4,76	0,25	0,84	0,2	2,45	–	2,01	2,40	4,29	4,21	4,59
Lu	0,5	0,48	0,37	0,04	0,00	0,01	0,13	0,4	0,71	0,04	0,13	0,03	0,35	–	0,3	0,35	0,63	0,64	0,70
Hf	2,87	2,67	2,77	0,23	0,05	0,03	2,22	1,78	2,84	0,22	1,84	0,27	1,4	–	2,16	1,95	2,64	2,53	2,98
Ta	0,13	0,27	0,63	0,08	0,02	0,06	0,47	0,07	0,23	0,11	0,21	0,07	0,13	–	0,34	0,12	0,19	0,14	0,18
Th	0,38	0,57	3,27	0,15	0,09	0,17	10,91	0,51	0,29	0,02	1,03	0,22	1,18	–	1,15	0,43	0,28	0,24	0,62
U	0,29	0,4	1,72	0,16	0,02	0,04	0,76	0,32	0,11	0,004	0,43	0,07	0,6	–	0,57	0,22	0,23	0,39	0,20
(La/Sm) _n	0,84	0,94	2,78	5,12	2,27	5,55	10,65	0,95	0,68	0,93	5,09	3,08	1,98	–	1,68	0,81	0,59	0,55	0,73
(La/Yb) _n	1,04	1,46	5,92	5,19	0,80	14,69	52,35	1,3	0,77	2,37	12,64	7,14	7,1	–	3,57	7,94	15,56	0,52	0,73

Примечание. 1–3, 8–10, 15, 16 – метагаббро; 4 – метаверлит; 5 – дунит; 6, 14 – перидотит; 7, 11 – габбродиорит; 12 – плагиовестерит; 13 – габбро; 17–19 – метадолерит. Оксиды даны в мас. %, элементы-примеси – в г/т.

Note. 1–3, 8–10, 15, 16 – metagabbro; 4 – metawehrlite; 5 – dunite; 6, 14 – peridotite; 7, 11 – gabbrodiorite; 12 – plagiowebsterite; 13 – gabbro; 17–19 – metadolerite. Oxides are given in wt. %, trace elements in ppm.

Поведение РЗЭ в мафитовой части офиолитового разреза имеет несколько особенностей (рис. 2). Для пород Семеновского массива и гор Северная и Зеленая несмотря на слабое обогащение данными элементами относительно базальтов срединно-океанических хребтов (N-MORB), характерны близкие спектры распределения с типичным обеднением легкими РЗЭ: $La/Sm_n = 0,55–0,73$; $La/Yb_n = 0,52–0,77$.

Для отдельных пород гор Северная и Зеленая, Бархатного и Семеновского массивов фракционирование лантаноидов проявлено слабо ($La/Sm_n = 0,84–1,09$; $La/Yb_n = 1,04–1,72$). Эти породы вполне могут быть сопоставимы также с базальтами MOR-типа. В некоторых мафитовых породах фракционирование лантаноидов более резкое с $La/Sm_n = 1,68–2,78$ и $La/Yb_n = 3,56–7,10$. Среди них присутствуют как породы, максимально приближенные к продуктам E-MORB, так и тяготеющие к образованиям островодужных систем с положительной европиевой аномалией ($Eu/Eu^* = 1,12$). Для габбродиоритов гор Северная и Зеленая характерна достаточно резкая дифференциация редкоземельных элементов $La/Sm_n = 5,09–10,65$ и $La/Yb_n = 12,64–52,35$ и отмечается дефицит концентраций тяжелых лантаноидов, что, вероятно, отражает процессы внутрикамерной дифференциации габброидов.

В целом для пород характерна общая тенденция роста содержания лантаноидов вверх по разрезу океанической коры, как и для большинства офиолитов, в том числе и для фрагментов MOR-типа [Магматические..., 1985].

Наиболее выразительной особенностью для всех пород на мультиэлементных диаграммах (рис. 2) является избирательное обогащение определенным

набором элементов (Cs, Ba, Sr, ± Sm) и отсутствие повышенных концентраций других элементов (Rb, Ta, Nb, Hf, Zr). Эту особенность можно объяснить изменением состава вещества мантийного источника островодужной базальтовой магмы за счет привноса «субдукционной компоненты», т.е. водных и кремнеземистых флюидов, выделяющихся из нижележащей зоны субдукции [Пирс и др., 1987].

В целом по уровню концентрации большинства компонентов исследуемые мафитовые породы превосходят базальты срединно-океанических хребтов, что указывает на вероятный задуговой режим их формирования. Это также подтверждается на дискриминационных диаграммах для определения геодинамических обстановок [Дугарова и др., 2023]. На диаграмме Nb/Yb – Th/Yb [Pearce, 2008] исследуемые породы офиолитовой ассоциации смещены из поля N-MORB – E-MORB – OIB в сторону более высоких значений Th/Yb, что позволяет предположить их генерацию в надсубдукционной обстановке (см. рис. 3, a). Для оценки степени субдукционного влияния была использована диаграмма Ti – V [Shervais, 1982] (рис. 3, b). Исследуемые породы показывают широкий разброс соотношений Ti/V от <10 до 50, что соответствует полям от бонинитов и островодужных толеитов до магм MORB, которые встречаются в магматических системах под влиянием субдукции [Shervais, 1982; Dilek, Furnes, 2009, 2011; Xia, Li, 2019]. На эти диаграммы вынесены поля базальтов BABB по [Li et al., 2015], где использовались данные по базальтам бассейнов Лау и Вудларк, а также Окинавского и Южно-Фиджийского задуговых бассейнов.

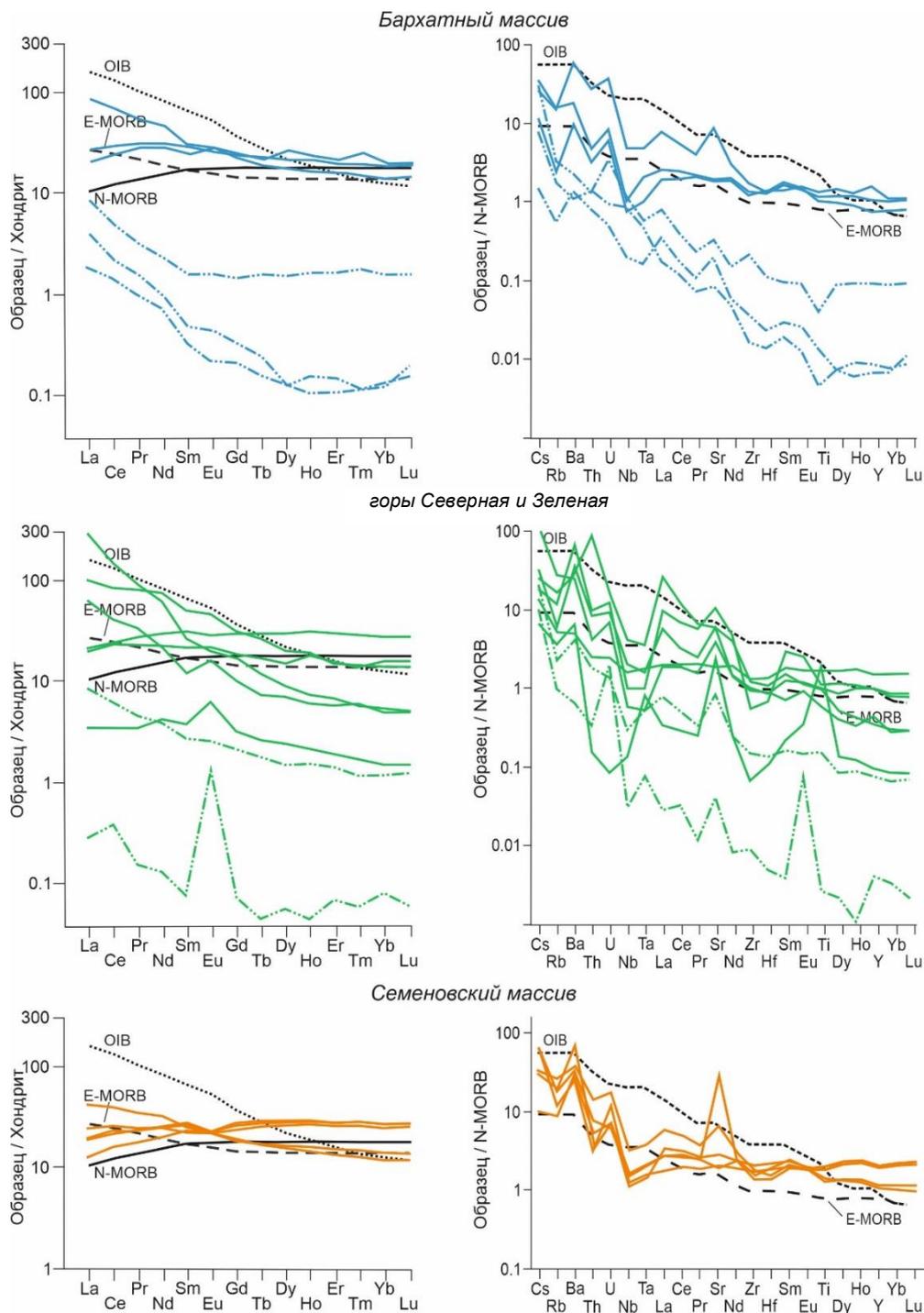


Рис. 2. Нормированные по хондриту (C_1) и N-MORB-базальтам [Sun, McDonough, 1989] спектры распределения редкоземельных и редких элементов в породах офиолитовой ассоциации Кузнецкого Алатау Пунктирной линией обозначены ультрамафитовые породы, сплошной – мафитовые породы. Для сравнения показаны средние составы нормальных и обогащенных базальтов срединно-океанических хребтов (N-MORB и E-MORB) и базальтов океанических островов (OIB) по [Sun, McDonough, 1989]

Fig. 2. Chondrite-normalized (C_1) REE patterns and N-MORB-normalized multi-element patterns of the Kuznetsk Alatau for rocks of the ophiolite association of the Kuznetsk Alatau after [Sun, McDonough, 1989]

The dotted line indicates ultramafic rocks, the solid line indicates mafic rocks. For comparison, the average compositions of normal and enriched mid-ocean ridge basalts (N-MORB and E-MORB) and ocean island basalts (OIB) are shown according to [Sun, McDonough, 1989]

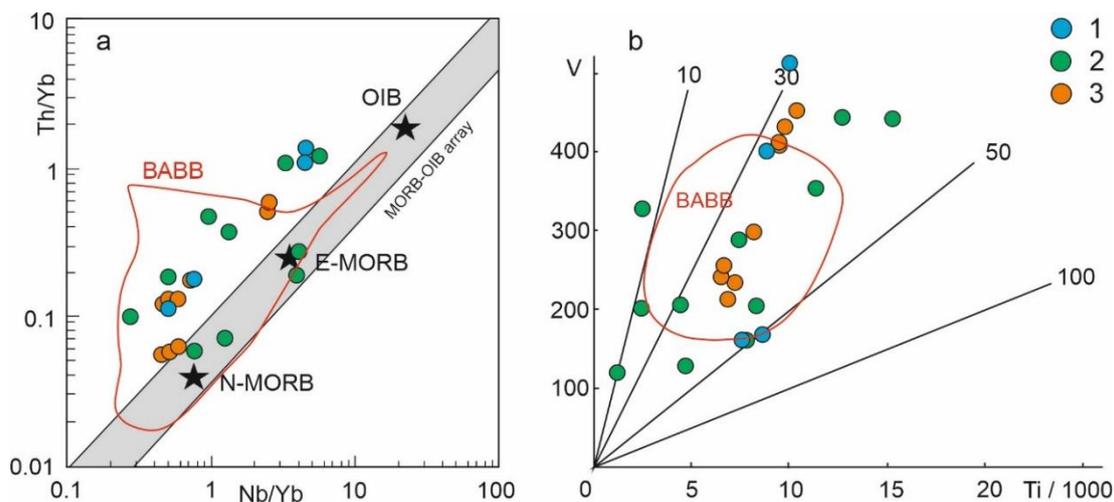


Рис. 3. Дискриминационные диаграммы

a – Th/Yb – Nb/Yb [Pearce, 2008]: BABB – базальты задуговых бассейнов; b – V – Ti/1000 [Shervais, 1982]: 10–20 – островодужные толеиты (IAT); 20–50 – базальты срединно-океанических хребтов (MORB), 10–50 – базальты задуговых бассейнов (BABB). 1 – Бархатный массив, 2 – горы Северная и Зеленая, 3 – Семеновский массив

Fig. 3. Discrimination diagrams

a – Th/Yb – Nb/Yb [Pearce, 2008]: BABB – back-arc basin basalts; b – V – Ti/1000 [Shervais, 1982]: 10–20 – island arc tholeiites (IAT); 20–50 – MORB, 10–50 – BABB. 1 – Barkhatny massif, 2 – Severnaya and Zelenaya mountains, 3 – Semenovskiy massif

Таблица 2

Изотопный Sm-Nd состав пород офиолитовой ассоциации Кузнецкого Алатау

Table 2

Sm-Nd isotopic composition of rocks of the ophiolite association of the Kuznetsk Alatau

Образец, порода	Sm, ppm	Nd, ppm	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd ± 2σ	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _T	εNd(T)	T _{Nd} (DM)
Бархатный массив							
Бх-34/16 (WR), дунит	0,032	0,126	0,15254	0,512842	0,511891	9,4	768
Бх-34/19 (WR), хр. дунит	0,080	0,480	0,09940	0,512514	0,511894	9,4	848
Бх-5/5 (WR), гарцбургит	0,048	0,196	0,148408	0,512837 ± 36	0,511902	9,8	731
Бх-78/6 (WR), гарцбургит	0,030	0,130	0,1290	0,512709	0,511896	9,7	794
Бх-91/4* (WR), метаверлит	0,283	1,047	0,16334	0,512818	0,511799	7,6	1004
Бх-91/4 (WR), метаверлит	0,400	1,610	0,15120	0,512761	0,511818	8,0	948
Бх-6/1 (WR), метагаббро	4,850	23,732	0,12353	0,512581	0,511811	7,8	962
Бх-1/3 (WR), метагаббро	4,090	12,600	0,19632	0,513076 ± 9	0,511852	8,6	650
Бх-1/3 (Amp), Метагаббро	3,750	11,080	0,20437	0,513095 ± 6	0,511820	8,0	899
Бх-1/3 (Pl), метагаббро	2,540	8,480	0,18082	0,512974 ± 6	0,511846	8,5	816
Бх-22/3 (WR), метагаббро	5,182	25,254	0,12404	0,512739 ± 8	0,511965	10,8	699
горы Северная и Зеленая							
Зс-27/9 (WR), перидотит	0,079	0,253	0,18930	0,512574 ± 63	0,511393	-0,3	3568
Зс-27/9* (WR), перидотит	0,015	0,042	0,21314	0,513005 ± 363	0,511676	5,2	
Зс-26/10 (WR), пл-вебстерит	0,235	0,964	0,14736	0,512139	0,511220	-3,7	2313
Зс-26/10* (WR), пл-вебстерит	0,248	0,936	0,16030	0,512159	0,511159	-4,9	2812
Зс-2/6 (WR), габбродиорит	5,112	15,051	0,20528	0,513086	0,511806	7,7	1158
Зс-23/4 (WR), метагаббро	4,373	14,747	0,17923	0,512958 ± 13	0,511840	8,4	849
Зс-23/4* (WR), метагаббро	4,910	14,800	0,18250	0,512955	0,511817	7,9	953
Зс-23/12 (WR), метагаббро	4,902	14,470	0,20478	0,513077 ± 6	0,511799	7,6	1246
Зс-26/5 (WR), метагаббро	0,657	2,286	0,17371	0,512019	0,510936	-9,3	
Зс-26/9 (WR), габбродиорит	1,965	10,449	0,11367	0,511622	0,510913	-9,7	2318
Семеновский массив							
См-3/46 (WR), метагаббро	4,080	15,490	0,15920	0,512843 ± 5	0,511850	8,6	859
См-010/11 (WR), метадолерит	5,116	11,778	0,26254	0,513097 ± 10	0,511460	0,9	
См-08/97 (WR), метагаббро	4,100	12,002	0,20650	0,512946 ± 14	0,511658	4,8	
См-010/38 (WR), метадолерит	4,072	10,665	0,230769	0,513144 ± 10	0,511705	5,8	
См-9/5 (WR), диорит	0,506	1,708	0,179056	0,513011 ± 54	0,511894	9,5	612

Примечание. WR – валовый состав породы, Amp – амфибол, Pl – плагиоклаз, хр. дунит – хромитовый дунит. (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_T и εNd(T) пересчитаны на 950 млн лет.

Note. WR – whole-rock composition, Amp – amphibole, Pl – plagioclase, chromite dunite. (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_T and εNd(T) are calculated for the age of 950 Ma.

Таблица 3

Изотопный Rb-Sr состав пород офиолитовой ассоциации Кузнецкого Алатау

Table 3

Rb-Sr isotopic composition of rocks of the ophiolite association of the Kuznetsk Alatau

Образец, порода	Rb, ppm	Sr, ppm	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_T$	$\epsilon\text{Sr}(T)$
Бархатный массив						
Бх-34/16 (WR), дунит	0,41	7,3	0,164699	$0,70789 \pm 18$	0,705652	32,1
Бх-34/19 (WR), хр. дунит	0,44	4,8	0,271181	$0,71185 \pm 19$	0,708165	67,9
Бх-91/4 (WR), метаверлит	1,64	41	0,115762	$0,70715 \pm 16$	0,705577	31,1
Бх-6/1 (WR), метагаббро	10,83	200,7	0,156168	$0,70439 \pm 7$	0,702268	-16,0
Бх-1/3 (WR), метагаббро	1,84	120,5	0,044179	$0,70432 \pm 1$	0,703720	4,7
гг, Северная-Зеленая						
ЗС-27/9 (WR), перидотит	22,48	312,7	0,208074	$0,70664 \pm 9$	0,703812	6,0
ЗС-26/10 (WR), плагиовестерит	1,06	21,2	0,144959	$0,70770 \pm 19$	0,705730	33,3
ЗС-2/6 (WR), габбродиорит	15,41	688,6	0,064742	$0,70514 \pm 11$	0,704260	12,4
ЗС-26/5 (WR), метагаббро	3,62	327,9	0,031997	$0,70717 \pm 10$	0,706735	47,5
ЗС-26/9 (WR), габбродиорит	3,62	500,2	0,020959	$0,70676 \pm 9$	0,706475	43,8
Семеновский массив						
См-3/46 (WR), метагаббро	10,03	459,6	0,061572	$0,70443 \pm 22$	0,703593	2,9
См-010/11 (WR), метадолерит	7,23	1939,5	0,010518	$0,70706 \pm 21$	0,706917	50,1
См-08/97 (WR), метагаббро	3,32	181,4	0,051638	$0,70502 \pm 15$	0,704318	13,2
См-010/38 (WR), метадолерит	4,25	126,2	0,095015	$0,70736 \pm 20$	0,706069	38,1
См-9/5 (WR), диорит	1,3	138,2	0,026540	$0,70442 \pm 19$	0,704059	9,5

Примечание. WR – валовый состав породы, хр. дунит – хромитовый дунит. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_T$ и $\epsilon\text{Sr}(T)$ пересчитаны на 950 млн лет.

Note. WR – whole-rock composition, chromite dunite. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_T$ and $\epsilon\text{Sr}(T)$ are calculated for the age of 950 Ma.

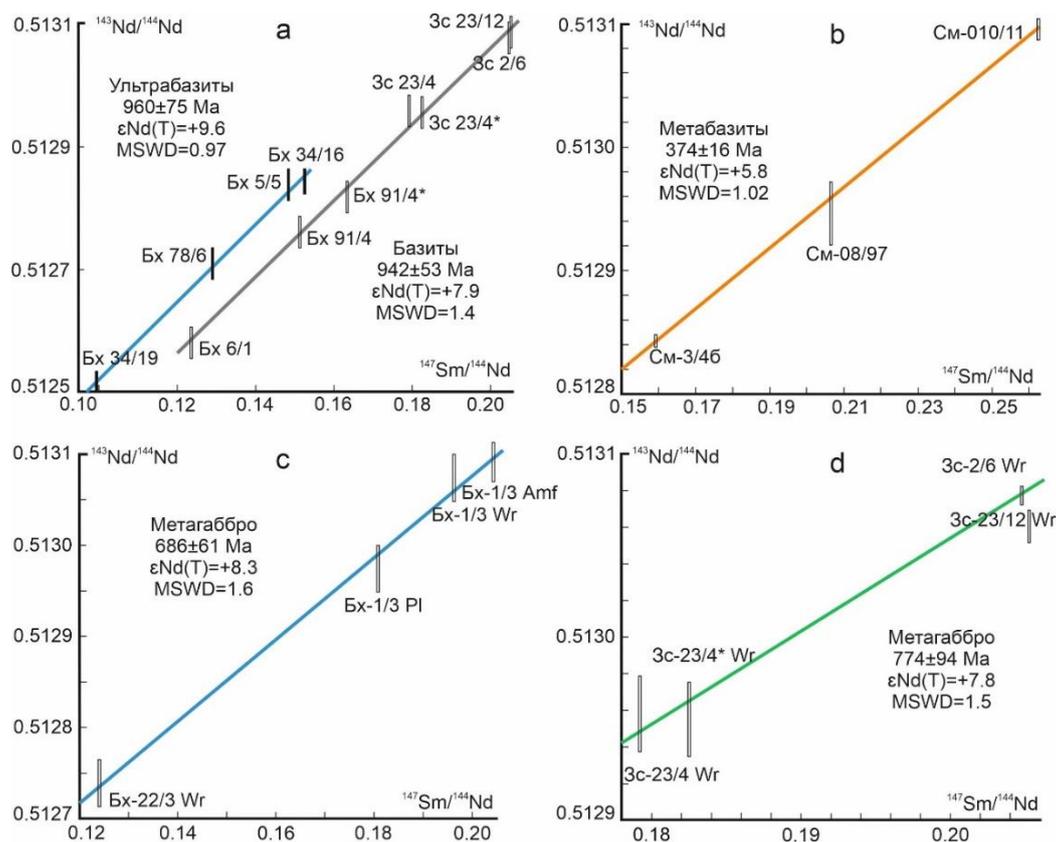


Рис. 4. Sm-Nd изохроны для пород офиолитовой ассоциации Кузнецкого Алатау

Номера образцов и сокращения см. в табл. 2

Fig. 4. Sm-Nd isochrones for rocks of the ophiolite association of the Kuznetsk Alatau

Sample numbers and abbreviations see in Table 2

Sm-Nd и Rb-Sr изотопный анализ. Данные по изотопам Sr и Nd для пород офиолитовой ассоциации северного склона Кузнецкого Алатау приведены в табл. 2 и 3. Sm-Nd изохрона, построенная по валовым составам пяти образцов метагабброидов и двум образцам верлитов, соответствует возрасту 942 ± 53 млн лет, модельные возрасты $T_{Nd}(DM)$ варьируют от 849,2 до 1245,5 млн лет. Ультрамафиты (дуниты, гарцбургиты) горы Бархатной образуют изохрону с близким возрастом 960 ± 75 млн лет (см. рис. 4, a), $T_{Nd}(DM) = 731,2-848,4$ млн лет [Гертнер и др., 2012; Gertner et al., 2013]. Sm-Nd изохрона, построенная по плагиоклазу, амфиболу и валовым составам метагабброидов горы Бархатной, отвечает возрасту 686 ± 61 млн лет, а метабазиты гор Северной и Зеленой образуют изохрону с близким возрастом, но со значительной погрешностью 774 ± 94 млн лет (рис. 4, c, d). Наклон изохроны, полученной по валовым составам трех образцов метагабброидов Семеновского массива, соответствует возрасту 374 ± 16 млн лет (рис. 4, b).

Основываясь на полученных данных возрастов, значения ϵNd и ϵSr были пересчитаны на ~ 950 млн лет (рис. 5). Для пород Бархатного массива все значения ϵNd положительные и варьируют от +7,6 до +10,8, что соответствует параметрам деплетированной мантии типа MOR, но разброс значений ϵSr весьма широк (от -16 до +67,9), что предполагает либо влияние корового материала, либо постмагматические изменения. Мафитовые породы Семеновского массива отличаются более широким диапазоном значений параметров изотопного состава неодаима и стронция ($(^{143}Nd/^{144}Nd)_T = 0,511460-0,511894$, $\epsilon Nd \sim 0,9-9,5$ и $(^{87}Sr/^{86}Sr)_T = 0,7035-0,7069$, $\epsilon Sr \sim -2,9-50,1$), что также свидетельствует о взаимодействии с материалом коры. Для пород гор Северная и Зеленая ϵNd и ϵSr варьируют от -9,7 до +8,4 и от +2,9 до +50,1 соответственно. Возможной причиной такого разброса изотопных отношений обычно рассматривается контаминация деплетированного источника рециклированным коровым субстратом [Покровский, 2000].

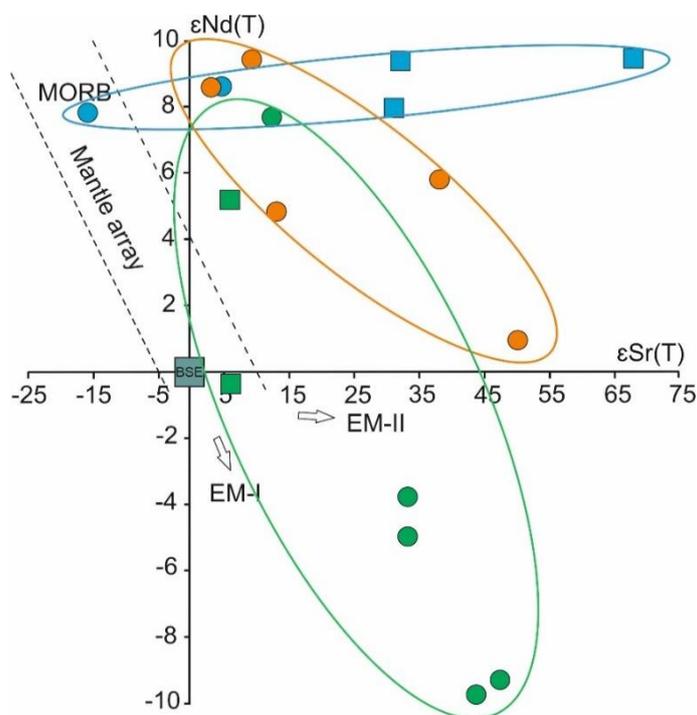


Рис. 5. Диаграмма $\epsilon Nd(T) - \epsilon Sr(T)$

Область Mantle array и положение резервуаров MORB, BSE (валовый состав силикатной Земли), EM I и EM II (два типа обогащенной мантии) показаны в соответствии с их современными изотопными параметрами [Zindler, Hart, 1986]. Синие квадраты – ультрамафиты Бархатного массива, зеленые квадраты – ультрамафиты гор Северная и Зеленая, кружки как на рис. 3

Fig. 5. $\epsilon Nd(T) - \epsilon Sr(T)$ diagram

The Mantle array region and the position of the MORB, BSE (bulk composition of silicate Earth), EM I and EM II reservoirs (two types of enriched mantle) are shown according to their modern isotopic parameters [Zindler, Hart, 1986]. Symbols: blue squares – ultramafic rocks from the Barkhatny massif (Table 1, 2), green squares – ultramafic rocks from the Severnaya and Zelenaya mountains (Table 1, 2), circles – are the same as in Fig. 3

Возраст и источники вещества. Ранее венд-раннекембрийский возраст офиолитов Кузнецкого Алатау был установлен Sm-Nd изохронным методом (валовый состав, амфибол, плагиоклаз) по метабазитам конжинского комплекса 694 ± 43 млн лет и U-Pb изотопным методом по цирконам из плагиориолитов и плагиогранитов колтасского комплекса 544 ± 8 млн лет [Владимиров и др., 1999; Плотников и др., 2000]. Полученный нами верхнепротерозойский возраст (942 ± 53 и 960 ± 75 млн лет) по ультрамафитам и мафитам гор Бархатной, Северной и Зеленой значительно отличается и позволяет предположить более древний возраст офиолитов севера Кузнецкого Алатау. Этот вывод подтверждается последними полученными данными по U-Pb датированию магматических цирконов из плагиогранитов Гремячинского и гранитов Северо-Гремячинского массивов, которые формировались на рубеже 890–880 млн лет. Гранитоиды имеют секущие взаимоотношения с породами офиолитовой (кундусуюльской) ассоциации, что указывает на раннепротерозойский возраст [Руднев и др., 2006, 2023].

Изохронные возрасты по метагабброидам (686 ± 61 и 774 ± 94 млн лет) близки возрастам пород конжин-

ского комплекса и, вероятно, связаны с метаморфическими преобразованиями мафитов офиолитовой ассоциации. Наиболее молодой возраст 374 ± 16 млн лет получен по метагабброидам Семеновского массива, которые наиболее интенсивно подверглись вторичному изменению и тектонической переработке.

При диагностике источников вещества важную роль играют соотношения элементов Th-Nb-La(Ce) на диаграмме А.Д. Саундерса [Saunders et al., 1988] (рис. 6, b). Здесь рассматривается смешение нескольких компонентов: 1) деплетированная мантия MOR-типа (DMM); 2) остаточный компонент рециклированной океанической коры (RSC), прошедшей через зону субдукции; 3) субдукционный компонент (SDC), комплементарный RSC. Большая часть точек мафитов располагается в области базальтов задугового бассейна Лау, в том числе обладает повышенными Ce/Nb, Th/Nb и пониженными $(\text{Nb/La})_{\text{PM}}$ соотношениями, указывающими на участие субдукционного компонента или вклад корового материала. Для расплавов, выплавляющихся из надсубдукционной (поддуговой) мантии, т.е. компонента SDC, свойственны также отрицательные Nb-аномалии (см. рис. 2) [Сафонова и др., 2008; Туркина, Ножкин, 2008].

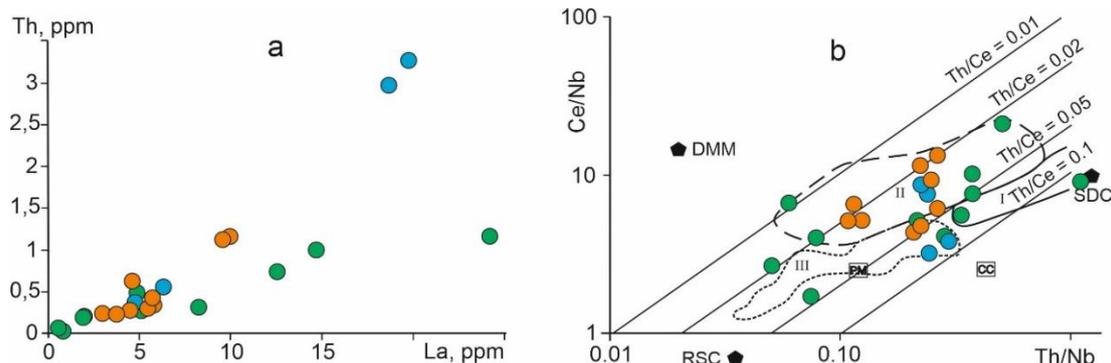


Рис. 6. Диаграммы: а – Th – La; б – Ce/Nb – Th/Nb по [Saunders et al., 1988]

б – DMM – деплетированная MORB мантия; RSC – остаточный материал океанической коры; SDC – субдукционный компонент, I – островодужные базальты, II – базальты задугового бассейна Лау, III – базальты океанических плато Онтонг Джава и Брокен Ридж, PM – примитивная мантия, CC – континентальная кора [Туркина, Ножкин, 2008]. Условные обозначения как на рис. 3

Fig. 6. Diagrams: a – Th – La; b – Ce/Nb – Th/Nb according to [Saunders et al., 1988]

б – DMM – depleted MORB mantle, RSC – residual slab component, SDC – subduction component; I – island-arc basalts, II – basalts of the Lau back-arc basin, III – basalts of the Ontong Java and Broken Ridge oceanic plateaus; CC – continental crust [Туркина, Ножкин, 2008]. Symbols are the same as in Fig. 3

Наличие в той или иной степени выраженной отрицательной аномалии Nb и отчетливой корреляции между Th и La (см. рис. 6, a) может свидетельствовать о влиянии корового материала на состав пород. Добавление корового материала может происходить в результате субдукции осадков в область генерации базальтового расплава или путем контаминации последнего при перемещении на верхнекоровый уровень [Туркина, Ножкин, 2008]. В пользу коровой кон-

таминации пород исследуемой офиолитовой ассоциации также свидетельствуют широкие вариации ϵNd и ϵSr (см. рис. 5).

Заключение

Таким образом, изучение изотопно-геохимических характеристик пород офиолитовой ассоциации северного склона Кузнецкого Алатау позволяет сделать следующие выводы:

1. Геохимические и изотопные данные подчеркивают различие между реститовыми и кумулятивными ассоциациями.

2. Офиолитовые комплексы севера Кузнецкого Алатау могли формироваться в диапазоне ~ 850–950 млн лет назад и представляют собой фрагменты океанической коры MOR- и SSZ-типа, соответствующие ранним этапам раскрытия Палеоазиатского океана.

Более молодые возрасты ~ 700 и 370 млн лет, которые фиксируются для метагабброидов, вероятно, отвечают возрасту метаморфических и метасоматических изменений мафитовых пород.

3. Разброс изотопных отношений Sr и Nd, а также поведение некоторых элементов (Th, Nb, La, Ce) указывают на явное взаимодействие мантийной и коровой составляющих при формировании офиолитов северного склона Кузнецкого Алатау.

Список источников

- Алабин Л.В.** Структурно-формационная и металлогеническая зональность Кузнецкого Алатау. Новосибирск : Наука, 1983. 102 с.
- Баянова Т.Б.** Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. М. : Наука, 2004. 172 с.
- Берзин Н.А., Колман Р.Г., Добрецов Н.Л., Зоненшайн Л.П., Сяо Сючань, Чанг Э.З.** Геодинамическая карта западной части Палеоазиатского океана // Геология и геофизика. 1994. № 7–8. С. 8–28.
- Берзин Н.А., Кунгурцев Л.В.** Геодинамическая интерпретация геологических комплексов Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. 1996. Т. 37, № 1. С. 63–81.
- Владимиров А.Г., Пономарева А.П., Каргополов С.А., Бабин Г.А., Плотников А.В., Гибшер А.С., Изох А.Э., Шокальский С.П., Бибикина Е.В., Журавлев Д.З., Пономарчук В.А., Халилов В.А., Травин А.В.** Неопротерозойский возраст древнейших образований Томского выступа (Горная Шория) на основании U-Pb, Sm-Nd и Ar-Ar изотопного датирования // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1999. Т. 7, № 5. С. 28–42.
- Войтенко Д.Н.** Петрология Кия-Шалтырского массива: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск. 2007. 20 с.
- 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.** Геохимическое сходство кембрийского щелочного и субщелочного магматизма (Кузнецкий Алатау, Сибирь): синтез новых данных // Геосферные исследования. 2022. № 3. С. 27–39.
- Гертнер И.Ф., Краснова Т.С., Баянова Т.Б., Дугарова Н.А., Врублевский В.В., Тишин П.А.** Изотопно-геохимическая неоднородность офиолитов Кузнецкого Алатау: оценка возраста формирования и источников вещества литосферы Палеоазиатского океана // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) : материалы совещания. Иркутск : ИЗК СО РАН, 2012. С. 55–56.
- Гончаренко А.И.** Деформация и петроструктурная эволюция альпинотипных гипербазитов. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1989. 404 с.
- Гончаренко А.И., Кузнецов П.П., Симонов В.А., Чернышов А.И.** Офиолитовая ассоциация Кузнецкого Алатау (на примере Среднетерсинского массива). Новосибирск : Наука, 1982. 105 с.
- Гринев О.М.** Эволюция щелочно-габброидного магматизма Кузнецкого Алатау : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 1990. 19 с.
- Гринев О.М.** Рифтовые системы Сибири: методология изучения, морфотектоника, минерагения. Томск : СТТ, 2007. 434 с.
- Добрецов Н.Л., Буслев М.М.** Позднекембрийско-ордовикская тектоника и геодинамика Центральной Азии // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 1. С. 93–108.
- Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Буслев М.М., Котляров А.В.** Магматизм и геодинамика Палеоазиатского океана на венд-кембрийском этапе его развития // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 9. С. 952–967.
- Дугарова Н.А., Гертнер И.Ф., Краснова Т.С.** Геохимия и условия формирования базитов офиолитовой ассоциации северного склона Кузнецкого Алатау // Геосферные исследования. 2023. № 4. С. 6–20.
- Дугарова Н.А., Тишин П.А., Гертнер И.Ф., Краснова Т.С.** Минералогия и условия образования metabазитов офиолитовой ассоциации северного склона Кузнецкого Алатау // Литосфера. 2017. Т. 17, № 4. С. 97–109.
- Казанский А.Ю., Ступаков С.И., Симонов С.А., Метелкин Д.В.** Геодинамика офиолитов Седнетерсинского массива (Кузнецкий Алатау) по палеомагнитным данным // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 10. С. 1036–1044.
- Колман Р.Г.** Офиолиты. М. : Мир, 1979. 269 с.
- Коновалова О.Г., Прусевич Н.А.** Дунит-гарцбургитовые массивы Кузнецкого Алатау и Салаира. Новосибирск : Наука, 1977. 166 с.
- Краснова Т.С.** Петрология ультрамафитовых массивов гор Северной-Зеленой и Бархатной (Кузнецкий Алатау) : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 2005. 20 с.
- Краснова Т.С., Гертнер И.Ф., Уткин Ю.В.** Перспективы платиноносности офиолитов Кузнецкого Алатау // Петрология магматических и метаморфических комплексов : материалы науч. конф. Томск : ЦНТИ, 2001. Вып. 2. С. 229–235.
- Кузнецов В.А.** Геотектоническое районирование Алтае-Саянской области // Вопросы геологии Азии. М. : АН СССР, 1954. Т. 1. С. 202–227.
- Магматические горные породы.** Т. 3 / Андреева Е.Д., Богатиков О.А., Борсук А.М. и др. М. : Наука, 1985. 486 с.
- Магматические горные породы.** Т. 5 / Богатиков О.А., Васильев Ю.Р., Дмитриев Ю.И. и др. М. : Наука, 1988. 507 с.
- Монич В.К.** Докембрийский офиолитовый пояс Кузнецкого Алатау // Доклады Академии наук СССР. 1941. Т. 30, № 12. С. 155–158.
- Мусатов Д.И., Тарков А.П.** К вопросу о тектоническом строении центральной части Саяно-Алтайской складчатой области // Доклады Академии наук СССР. 1959. Т. 126, № 6. С. 1323–1325.

- Мустафаев А.А.** Петрология диахронного Университетского фойдолит-габбрового плутона (Кузнецкий Алатау) : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 2022. 26 с.
- Пинус Г.В., Кузнецов В.А., Волохов И.М.** Гипербазиты Алтае-Саянской складчатой области. М. : Госгеолтехиздат, 1958. 295 с.
- Пирс Дж.А., Липпард С.Дж., Роберте С.** Особенности состава и тектоническое значение офиолитов над зоной субдукции // Геология окраинных бассейнов / под ред. Б.П. Кокелаара, М.Ф. Хаулса. М. : Мир, 1987. С. 134–165.
- Плотников А.В., Ступаков С.И., Бабин Г.А., Симонов В.А.** Возраст и геодинамическая природа офиолитов Кузнецкого Алатау // Доклады Академии наук. 2000. Т. 372, № 1. С. 80–85.
- Покровский Б.Г.** Коровая контаминация мантийных магм по данным изотопной геохимии. М. : Наука, 2000. 223 с.
- Руднев С.Н., Матуков Д.И., Сергеев С.А., Серов П.А.** Позднерифейские плагиограниты Кузнецкого Алатау: состав, возраст, источники // Доклады Академии наук. 2006. Т. 410, № 6. С. 1–7.
- Руднев С.Н., Туркина О.М., Семенова Д.В., Серов П.А.** Условия формирования и источники расплавов раннеопротерозойских гранитов северной части Кузнецкого Алатау // Геология и геофизика. 2023. Т. 64, № 2. С. 163–179.
- Сафонов И.Ю., Симонов В.А., Буслов М.М., Ота Ц., Маруяма Ш.** Неопротерозойские базальты Палеоазиатского океана из Курайского аккреционного клина (Горный Алтай): геохимия, петрогенезис, геодинамические обстановки формирования // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 4. С. 335–356.
- Симонов В.А.** Петрогенезис офиолитов: Термобарогеохимические исследования. Новосибирск : ОИГМ СО РАН, 1993. 247 с.
- Симонов В.А., Котляров А.В., Куликова А.В.** Условия формирования палеоокеанических комплексов Алтае-Саянской области. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2024. 309 с.
- Симонов В.А., Ступаков С.И., Лоскутов И.Ю., Ковязин С.В.** Палеогеодинамические условия формирования офиолитов Кузнецкого Алатау // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 12. С. 1759–1771.
- Ступаков С.И., Симонов В.А.** Особенности минералогии ультрабазитов – критерии палеогеодинамических условий формирования офиолитов Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика. 1997. Т. 38, № 4. С. 746–755.
- Туркина О.М., Ножкин А.Д.** Океанические и рифтогенные метавулканические ассоциации зеленокаменных поясов северо-западной части Шарьжалгайского выступа, Прибайкалье // Петрология. 2008. Т. 16, № 5. С. 501–526.
- Уткин Ю.В.** Петрология габброидов офиолитовой ассоциации Кузнецкого Алатау : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 1990. 279 с.
- Фор Г.** Основы изотопной геологии. М. : Мир, 1989. 590 с.
- Шинкарев Н.Ф., Иванников В.В.** Физико-химическая петрология изверженных пород. 2-е изд., перераб. и доп. Л. : Недра, 1983. 271 с.
- Шокальский С.П., Бабин Г.А., Владимиров А.Г. и др.** Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск : Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2000. 187 с.
- Dilek Y., Furnes H.** Structure and geochemistry of Tethyan ophiolites and their petrogenesis in subduction rollback systems // *Lithos*. 2009. V. 113, № 1–2. P. 1–20.
- Dilek Y., Furnes H.** Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere // *GSA Bulletin*. 2011. V. 123, № 3/4. P. 387–411.
- Gertner I.F., Bayanova T.B., Krasnova T.S., Vrublevskii V.V., Sayadyan G.R.** Age and matter sources of ophiolites of the Kuznetsk Alatau, SW Siberia: new Sm-Nd isotope data // *Mineralogical Magazine*. 2013. V. 77, № 5. P. 1159.
- Li C., Arndt N.T., Tang Q., Ripley E.M.** Trace element discrimination diagrams // *Lithos*. 2015. V. 232. P. 76–83.
- Ludwig K.R.** User's Manual for Isoplot/Ex, Version 2.10 // *A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley, CA, USA: Berkeley Geochronology Center Special Publication. 2008. V. 1. P. 1–46.
- Melcher F., Meisel T., Puhl J., Koller F.** Petrogenesis and geotectonic setting of ultramafic rocks in the Eastern Alps: constraints from geochemistry // *Lithos*. 2002. V. 65. P. 69–112.
- Metelkin D.V., Vernikovskiy V.A., Kazansky A.Yu.** Siberia – from Rodinia to Eurasia // *Tectonics*. Ed. D. Closson. InTech, 2011. P. 103–136.
- Nicolas A.** Structures of ophiolites and dynamics of oceanic lithosphere. Dordrecht, Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1989. 367 p.
- 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.
- Pearce J.A.** Immobile element fingerprinting of ophiolites // *Elements*. 2014. V. 10. P. 101–108.
- Rollinson H.R.** Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Essex : London Group UK Ltd., 1994. 352 p.
- Saunders A.D., Norry M.J., Tarney J.** Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs: trace element constraints // *Journal of Petrology*. 1988. Special Is. P. 415–445.
- Shervais J.W.** Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas // *Earth Planet. Sc. Lett.* 1982. V. 59. P. 101–118.
- Sun S.S., McDonough W.F.** Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Geol. Soc. Spec. Publ.* 1989. V. 42. P. 313–345.
- Xia L., Li X.** Basalt geochemistry as a diagnostic indicator of tectonic setting // *Gondwana Research*. 2019. V. 65. P. 43–67.
- Xiao W., Santosh M.** The western Central Asian orogenic belt: a window to accretionary orogenesis and continental growth // *Gondwana Research*. 2014. V. 25. P. 1429–1444.
- Zindler A., Hart S.R.** Chemical geodynamics // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 1986. V. 14. P. 493–571.

References

- Alabin L.V. *Strukturno-formacionnaya i metallogenicheskaya zonal'nost' Kuzneckogo Alatau* [Structural-formational and metallogenic zonality of the Kuznetsk Alatau]. Novosibirsk: Nauka. 1983. 102 p. In Russian
- Bayanova T.B. *Vozrast repernykh geologicheskikh kompleksov Kol'skogo regiona i dlitel'nost' processov magmatizma* [Age of reference geological complexes of the Kola Region and duration of magmatic processes]. Moscow: Nauka. 2004. 174 p. In Russian

- Berzin N.A., Kolman R.G., Dobretsov N.L., Zonenshajn L.P., Sjao Sjachun', Chang Je.Z. *Geodinamicheskaya karta zapadnoy chasti Paleoaziatskogo okeana* [Geodynamic map of the western part of the Paleo-Asian Ocean] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 1994. No. 7–8. pp. 8–28. In Russian
- Berzin N.A., Kungurtsev L.V. *Geodinamicheskaya interpretaciya geologicheskikh kompleksov Altae-Sajanskoy oblasti* [Geodynamic interpretation of Altai-Sayan geological complexes] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 1996. V. 37, No. 1. pp. 63–81. In Russian
- Vladimirov A.G., Ponomareva A.P., Kargopolov S.A., Babin G.A., Plotnikov A.V., Gibsher A.S., Izokh A.E., Shokal'skii S.P., Bibikova E.V., Zhuravlev D.Z., Ponomarchuk V.A., Khalilov V.A., Travin A.V. *Neoproterozoyskiy vozrast drevneyshikh obrazovaniy Tomskogo vystupa (Gornaya Shoriya) na osnovanii U-Pb, Sm-Nd i Ar-Ar izotopnogo datirovaniya* [Neoproterozoic age of oldest rocks from the Tom' inlier (Mountainous Shoriya): implication of U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr and Ar-Ar dating] // *Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyaciya* [Stratigraphy. Geological correlation]. 1999. V. 7, No. 5. pp. 437–451. In Russian
- Voitenko D.N. *Petrologiya Kiya-Shaltyrskogo massiva* [Petrology of the Kiya-Shaltyr massif]: avtoref. dis. ... kand. geol.-mineral. nauk. Tomsk. 2007. 20 p. 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. 24–53. doi: 10.1134/S0869591121010082
- Vrublevskii V.V. Geochemical similarity of Cambrian alkaline and subalkaline magmatism (Kuznetsk Alatau Orogen, Siberia): a new data synthesis // *Geosfernye issledovaniya* [Geosphere Research]. 2022. V. 3. pp. 27–39. In Russian doi: 10.17223/25421379/24/2.
- Gertner I.F., Krasnova T.S., Bajanova T.B., Dugarova N.A., Vrublevskij V.V., Tishin P.A. *Izotopno-geohimicheskaya neodnorodnost' ofiolitov Kuzneckogo Alatau: oценка vozrasta formirovaniya i istochnikov veshhestva litosfery Paleoaziatskogo okeana* [Isotope-geochemical heterogeneity of ophiolites from the Kuznetsk Alatau: estimate of formation age and sources of lithosphere of the Paleo-Asian Ocean] // *Geodinamicheskaya evolyuciya litosfery Central'no-Aziatskogo podvizhnogo poasa (ot okeana k kontinentu): materialy soveshchaniya* [Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent): meeting materials]. Irkutsk: IZK SO RAN. 2012. pp. 55–56. In Russian
- Goncharenko A.I. *Deformaciya i petrostrukturnaya jevoljuciya al'pinotipnyh giperbazitov* [Deformation and petrostructural evolution of alpine-type hyperbasites]. Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta. 1989. 404 p. In Russian
- Goncharenko A.I., Kuznetsov P.P., Simonov V.A., Chernyshov A.I. *Ofiolitovaya asociaciya Kuzneckogo Alatau (na primere Sredenetersinskogo massiva)* [Ophiolite association of the Kuznetsk Alatau (by the example as Srednetersinsky massif)]. Novosibirsk: Nauka. 1982. 105 p. In Russian
- Grinev O.M. *Evoluciya shchelochno-gabbroidnogo magmatizma Kuzneckogo Alatau* [Evolution of alkaline-gabbroid magmatism of the Kuznetsk Alatau]: avtoref. dis. ... kand. geol.-mineral. nauk. Tomsk. 1990. 19 p. In Russian
- Grinev O.M. *Riftovye sistemy Sibiri: metodologiya izucheniya, morfotektonika i minerageniya* [Rift systems of Siberia: study methodology, morphotectonics, and minerageny]. Tomsk: SST. 2007. 434 p. In Russian
- Dobretsov N.L., Buslov M.M. Late Cambrian-Ordovician tectonics and geodynamics of Central Asia // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2007. V. 48, No. 1. pp. 93–109. In Russian
- Dobretsov N.L., Simonov V.A., Buslov M.M., Kotljarov A.V. Magmatism and geodynamics of the Paleoeasian ocean at the Vendian-Cambrian stage of its evolution // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2005. V. 46, No. 9. pp. 952–967. In Russian
- Dugarova N.A., Gertner I.F., Krasnova T.S. Geochemistry and conditions for formation of mafic rocks of the ophiolite association from the northern slope of Kuznetsk Alatau // *Geosfernye issledovaniya* [Geosphere Research]. 2023. V. 4. pp. 6–20. In Russian. doi: 10.17223/25421379/29/1
- Dugarova N.A., Tishin P.A., Gertner I.F., Krasnova T.S. Mineralogy and metabasites formation conditions from ophiolite association at northern slope of Kuznetsk Alatau // *Litosfera*. 2017. V. 17(4). pp. 97–109. In Russian doi: 10.24930/1681-9004-2017-4-097-109
- Kazanskiy A.Ju., Stupakov S.I., Simonov S.A., Metelkin D.V. Geodynamics of ophiolites of the Sednetersinsky massif (Kuznetsk Alatau) based on paleomagnetic data // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2003. V. 44, No. 10. pp. 1036–1044. In Russian
- Kolman R.G. *Ofiolity* [Ophiolites]. Moscow: Mir. 1979. 269 p. In Russian
- Konovalova O.G., Prusevich N.A. *Dunit-garchburgitovye massivy Kuzneckogo Alatau i Salaira* [Dunit-harzburgite massifs of the Kuznetsk Alatau and Salair]. Novosibirsk: Nauka. 1977. 166 p. In Russian
- Krasnova T.S. *Petrologiya ul'tramafitovykh massivov gor Severnoj-Zelenoy i Barhatnoy (Kuzneckiy Alatau)* [Petrology of ultramafic massifs of the Severnaya-Zelenaya and Barkhatnaya mountains (Kuznetsk Alatau)]: avtoref. dis. ... kand. geol.-mineral. nauk. Tomsk. 2005. 20 p. In Russian
- Krasnova T.S., Gertner I.F., Utkin Ju.V. *Perspektivy platinonosnosti ofiolitov Kuzneckogo Alatau* [Prospects of platinum of ophiolites from the Kuznetsk Alatau] // *Petrologiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov* [Petrology of magmatic and metamorphic complexes]: Mat. nauch. konf. Tomsk: CNTI. 2001. V. 2. pp. 229–235. In Russian
- Kuznecov V.A. *Geotektonicheskoe rajonirovanie Altae-Sajanskoy oblasti* [Geotectonic zoning of the Altai-Sayan region] // *Voprosy geologii Azii* [Problems of geology of Asia]. Moscow: AN SSSR. 1954. V. 1. pp. 202–227. In Russian
- Magmaticheskie gornye porody* [Igneous rocks]. V. 3. / Andreeva E.D., Bogatikov O.A., Borsuk A.M. i dr. Moscow: Nauka. 1985. 486 p. In Russian
- Magmaticheskie gornye porody* [Igneous rocks]. V.5. / Bogatikov O.A., Vasil'ev Ju.R., Dmitriev Ju.I. i dr. Moscow: Nauka. 1988. 507 p. In Russian
- Magmaticheskie gornye porody* [Igneous rocks]. V.6. / Bogatikov O.A., Bogdanova S.V., Borsuk A.M. i dr. Moscow: Nauka. 1987. 439 p. In Russian
- Monich V.K. *Dokembrijskiy ofiolitovyy pojas Kuzneckogo Alatau* [Precambrian ophiolite belt of the Kuznetsk Alatau] // *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1941. V. 30, No. 12. pp. 155–158. In Russian
- Musatov D.I., Tarkov A.P. *K voprosu o tektonicheskom stroenii central'noj chasti Sajano-Altajskoj skladchatoj oblasti* [On the question of tectonic structure of the central part of the Sayano-Altai folded region] // *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1959. V. 126, No. 6. pp. 1323–1325. In Russian

- Mustafaev A.A. *Petrologiya diakhronnogo Universitetskogo foidolit-gabbrovogo plutona (Kuzneckiy Alatau)* [Petrology of the diachronous University foidolite-gabbro pluton (Kuznetsk Alatau)]: avtoref. dis. ... kand. geol.-mineral. nauk. Tomsk. 2022. 26 p. In Russian
- Pinus G.V., Kuznetsov V.A., Volohov I.M. *Giperbazity Altae-Sajanskoy skladchatoy oblasti* [Hyperbasites of the Altai-Sayan folded region]. Moscow: Gosgeoltekhizdat. 1958. 295 p. In Russian
- Pearce J.A., Lippard S.J., Roberte S. *Osobennosti sostava i tektonicheskoe znachenie ofiolitov nad zonoy subdukcii* [Compositional features and tectonic significance of ophiolites above a subduction zone] // In: *Geologiya okrainnykh morey* [Geology of marginal basins]. Ed. by B. P. Kokelaar and M. F. Hauls. Moscow: Mir. 1987. pp. 134–165.
- Platinonosnost' ul'trabazit-bazitovykh kompleksov yuga Sibiri* [Platinum content of ultramafic-mafic complexes in southern Siberia] / Bognibov V.I., Krivenko A.P., Izoh A.E. i dr. Novosibirsk: OIGGM SO RAN, 1995. 151 p. In Russian
- Plotnikov A.V., Stupakov S.I., Babin G.A., Simonov V.A. *Vozrast i geodinamicheskaya priroda ofiolitov Kuzneckogo Alatau* [Age and geodynamic nature of ophiolites from the Kuznetsk Alatau] // *Doklady Akademii Nauk*. 2000. V. 372, No. 1. pp. 80–85. In Russian
- Pokrovskii B.G. *Korovaya kontaminatsiya mantiynykh magm po dannym izotopnoy geokhimi* [Crustal contamination of mantle magmas according to isotope geochemistry] Moscow: Nauka. 2000. 223 p. In Russian
- Rudnev S.N., Matukov D. I., Sergeev S. A., Serov P.A. Late Riphean plagiogranites of Kuznetskii Alatau: composition, age, and sources // *Doklady Akademii Nauk* [Doklady Earth Science]. 2006. V. 410, No. 6. pp. 1–7. In Russian doi: 10.1134/S1028334X06080265
- Rudnev S.N., Turkina O.M., Semenova D.V., Serov P.A. Conditions of formation and sources of melts of Early Neoproterozoic granites in northern Kuznetsk Alatau // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2023. V. 64, No. 2. pp. 163–179. In Russian. doi: 10.15372/GiG2022109
- Safonova I. Yu., Siminov V.A., Buslov M.M., Ota T., Maruyama S.H. Neoproterozoic basalts of the Paleo-Asian ocean (Kurai accretionary zone, Gorny Altai, Russia): geochemistry, petrogenesis, and geodynamics // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2008. V. 49, No. 4. pp. 335–356. In Russian
- Simonov V.A. *Petrogenesis ofiolitov: Termobarogeokhimiicheskie issledovaniya* [Petrogenesis of ophiolites: Thermobarogeochemical studies]. Novosibirsk: OIGGM SO RAN, 1993. 247 p. In Russian
- Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Kulikova A.V. *Usloviya formirovaniya paleoceanicheskikh kompleksov Altae-Sajanskoy oblasti* [Conditions for the formation of paleoceanic complexes of the Altai-Sayan folded region]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2024. 309 p. In Russian
- Simonov V.A., Stupakov S.I., Loskutov I.Yu., Kovyazin S.V. *Paleogeodinamicheskie usloviya formirovaniya ofiolitov Kuzneckogo Alatau* [Paleogeodynamic settings of ophiolite formation in Kuznetsk Alatau] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 1999. V. 40, No. 12. pp. 1759–1771. In Russian
- Stupakov S.I., Simonov V.A. *Osobennosti mineralogii ul'trabazitov – kriterii paleogeodinamicheskikh uslovij formirovaniya ofiolitov Altae-Sajanskoy skladchatoy oblasti* [Features of the mineralogy of ultramafic rocks - criteria for paleogeodynamic conditions for the formation of ophiolites in the Altai-Sayan folded region] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 1997. V. 38, No. 4. pp. 746–755. In Russian
- Turkina O.M., Nozhkin A.D. Oceanic and riftogenic metavolcanic associations of greenstone belts in the northwestern part of the sharyzhalgai uplift, baikal region // *Petrology*. 2008. V. 16, No. 5. pp. 501–526 In Russian doi: 10.1134/S0869591108050044
- Utkin Yu.V. *Petrologiya gabbroidov ofiolitovoy associacii Kuzneckogo Alatau* [Petrology of gabbroids of the ophiolite association of the Kuznetsk Alatau]: diss. ...kand. geol.-mineral. nauk. Tomsk. 1990. 279 p. In Russian
- For G. *Osnovy izotopnoy geologii* [Fundamentals of isotope geology]. Moscow: Mir, 1989. 590 p. In Russian
- Shinkarev N.F., Ivannikov V.V. *Fiziko-khimiicheskaya petrologiya izverzhennykh porod* [Physiochemical petrology of igneous rocks]. 2-e izd., pererab. i dop. Leningrad: Nedra, 1983. 271 p. In Russian
- Shokal'skii S.P., Babin G.A., Vladimirov A.G. i dr. *Korreljatsiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov zapadnoj chasti Altae-Sajanskoy skladchatoy oblasti* [Correlation of igneous and metamorphic complexes of the western part of the Altai-Sayan folded region]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, filial "GEO", 2000. 187 p. In Russian
- Condie K.C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // *Lithos*. 2005. V. 79. pp. 491–504. doi:10.1016/j.lithos.2004.09.014
- Dilek Y., Furnes H. Structure and geochemistry of Tethyan ophiolites and their petrogenesis in subduction rollback systems // *Lithos*. 2009. V. 113, No. 1–2. pp. 1–20. doi:10.1016/j.lithos.2009.04.022
- Dilek Y., Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere // *GSA Bulletin*. 2011. V. 123, No. 3/4. pp. 387–411. doi: 10.1130/B30446.1
- Gertner I.F., Bayanova T.B., Krasnova T.S., Vrublevskii V.V., Sayadyan G.R. Age and matter sources of ophiolites of the Kuznetsk Alatau, SW Siberia: new Sm-Nd isotope data // *Mineralogical Magazine*. 2013. V. 77, No. 5. pp. 1159.
- Li C., Arndt N.T., Tang Q., Ripley E.M. Trace element discrimination diagrams // *Lithos*. 2015. V. 232. pp. 76–83. doi.org/10.1016/j.lithos.2015.06.022
- Ludwig, K.R. *User's Manual for Isoplot/Ex, Version 2.10*. // A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley, CA, USA: Berkeley Geochronology Center Special Publication. 1999. V. 1. pp. 1–46.
- Melcher F., Meisel T., Puhl J., Koller F. Petrogenesis and geotectonic setting of ultramafic rocks in the Eastern Alps: constraints from geochemistry // *Lithos*. 2002. V. 65. pp. 69–112.
- Metelkin D.V., Vernikovskiy V.A., Kazansky A.Yu. Siberia – from Rodinia to Eurasia // *Tectonics*. Ed. D. Closson. InTech, 2011. pp. 103–136.
- Nicolas A. *Structures of ophiolites and dynamics of oceanic lithosphere*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989. 367 p.
- 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. doi: 10.1016/j.lithos.2007.06.016
- Pearce J.A. Immobile element fingerprinting of ophiolites // *Elements*. 2014. V. 10. pp. 101–108. doi: 10.2113/gselements.10.2.101
- Rollinson H.R. *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Essex: London Group UK Ltd., 1994. 352 p.

Saunders A.D., Norry M.J., Tarney J. Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs: trace element constraints // Journal of Petrology. 1988. Special Is. pp. 415–445.

Shervais J.W. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas // Earth Planet. Sc. Lett. 1982. V. 59. pp. 101–118.

Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geol. Soc. Spec. Publ. 1989. V. 42. pp. 313–345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

Xia L., Li X. Basalt geochemistry as a diagnostic indicator of tectonic setting // Gondwana Research. 2019. V. 65. pp. 43–67. doi: 10.1016/j.gr.2018.08.006

Xiao W., Santosh M. The western Central Asian orogenic belt: a window to accretionary orogenesis and continental growth // Gondwana Research. 2014. V. 25. pp. 1429–1444. doi: 10.1016/j.gr.2014.01.008

Zindler A., Hart S.R. Chemical geodynamics // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1986. V. 14. pp. 493–571. doi: 10.1146/annurev.ea.14.050186.002425

Информация об авторах:

Дугарова Н.А., младший научный сотрудник, лаборатория геохронологии и геодинамики; ассистент, кафедра петрографии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: nadyadugarova@mail.ru

Гертнер И.Ф., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра петрографии; заведующий лабораторией геохронологии и геодинамики; научный сотрудник, лаборатория структурной петрологии и минералогии, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: labspm@ggf.tsu.ru

Краснова Т.С., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра петрографии; научный сотрудник, лаборатория геохронологии и геодинамики, геолого-географический факультет, начальник Научного управления, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: science@mail.tsu.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Dugarova N.A., Junior Researcher, Laboratory of Geochronology and Geodynamics; Assistant, Department of Petrography, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: nadyadugarova@mail.ru

Gertner I.F., Cand. Sci.(Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Petrography; Head of the Laboratory of Geochronology and Geodynamics; Researcher, Laboratory of Structural Petrology and Mineralogy, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: labspm@ggf.tsu.ru

Krasnova T.S., Cand. Sci.(Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Petrography; Researcher, Laboratory of Geochronology and Geodynamics; Faculty of Geology and Geography; Head of the Scientific Department, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: science@mail.tsu.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.07.2025; одобрена после рецензирования 15.10.2025; принята к публикации 30.11.2025

The article was submitted 12.07.2025; approved after reviewing 15.10.2025; accepted for publication 30.11.2025