

**Палеопротерозойские роговообманковые габбро
Гнилушинского массива Курского блока Сарматии:
геохронология, источники расплавов и тектоническая позиция**

©2022 К. А. Савко^{1✉}, А. В. Самсонов², Е. Х. Кориш¹,
В. Д. Вахнин¹, Н. С. Базиков¹, А. Н. Ларионов³, С. В. Цыбуляев¹

¹Воронежский государственный университет,

Университетская пл., 1, Воронеж, 394018, Воронеж, Российская Федерация

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ)
РАН, г. Москва Старомонетный пер., 35, 109017, Москва, Российская Федерация

³Центр изотопных исследований Всероссийского геологического института им. Карпинского,
Средний просп., 74, 199106, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

Введение: В палеопротерозойской Тим-Ястребовской синформе восточной Сарматии присутствуют интрузии габброидов. Самая крупная из них – Гнилушинский массив роговообманковых габбро – отличается по возрасту, минералогии и геохимии от габброноритов золотухинского комплекса. Цель настоящей статьи – определение возраста, источников расплавов и тектонической позиции Гнилушинского массива роговообманковых габбро.

Методика: Для определения возраста образования и источников базитовых расплавов было проведено геохимическое, U-Pb, и Sm-Nd изотопное изучение пород Гнилушинского массива.

Результаты и обсуждение: Габбро Гнилушинского массива являются породами известково-щелочной серии, обогащенными легкими редкоземельными и литофильными элементами с устойчивой обратной корреляцией MgO – Al₂O₃. Высокоглиноземистые разности представляют остаточные расплавы, а магнезиальные могут быть комплементарным кумулусом. Возраст кристаллизации массива составляет 2031 млн лет. Массив имеет посттектоническую позицию и метасоматизированный мантийный источник.

Заключение: Постколлизийная тектоника наследовала обстановку активной окраины, поскольку архейский Sm-Nd модельный возраст габбро указывает на приуроченность его к краю Курского архейского блока.

Ключевые слова: Курский блок, палеопротерозой, роговообманковое габбро, U-Pb изотопный возраст, источники расплавов, субдукция.

Источник финансирования: Исследование было поддержано госбюджетной темой ИГЕМ РАН № 121041500222-4.

Для цитирования: Савко К. А., Самсонов А. В., Кориш Е. Х., Вахнин В. Д., Базиков Н. С., Ларионов А. Н., Цыбуляев С. В. Палеопротерозойские роговообманковые габбро Гнилушинского массива Курского блока Сарматии: геохронология, источники расплавов и тектоническая позиция // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2022. №3. С. 4–19. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/3/4-19>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Савко Константин Аркадьевич, e-mail: ksavko@geol.vsu.ru

Введение

Палеопротерозойские интрузии базитов часто встречаются в пределах Курского блока Сарматии, и все они, за исключением интрузивных траппов смородинского комплекса с возрастом около 1.8 млрд лет, отнесены к золотухинскому дунит-перидотит-габброноритовому комплексу [1]. Его возраст составляет 2066 ± 2 млн лет [1].

В одной из самых крупных палеопротерозойских синформ – Тим-Ястребовской (рис. 1) – находятся многочисленные диорит-гранодиоритовые интрузии стойло-николаевского комплекса с возрастом 2.05–2.07 млрд лет, представляющие наиболее масштабное проявление постколлизийного палеопротерозойского магматизма в Курском блоке Сарматии [3, 4]. Кроме них присутствуют интрузии и силлы габброидов, о которых в литературе нет никаких сведений. Самый крупный из них – Гнилушинский массив роговообманковых габбро (рис. 2). Таким образом, несмотря на

многочисленные проявления базитового магматизма в палеопротерозое Курского блока, пока опубликована единственная прецизионная датировка их возраста [1] и немногочисленные геохимические и Sm-Nd изотопные данные с их противоречивой интерпретацией [5]. По этой причине пока нет понимания геодинамической позиции палеопротерозойского базитового магматизма.

Роговообманковое габбро Гнилушинской интрузии в Тим-Ястребовской структуре отличается по минералогии и геохимии от габброноритов золотухинского комплекса. Настоящая статья призвана внести вклад в расшифровку петрогенезиса палеопротерозойского базитового магматизма Курского блока. Ее цель – определение возраста кристаллизации, источников расплавов и тектонической позиции Гнилушинского массива роговообманковых габбро в Тим-Ястребовской структуре на основе их геохимического изучения, U-Pb и Sm-Nd изотопной систематики.

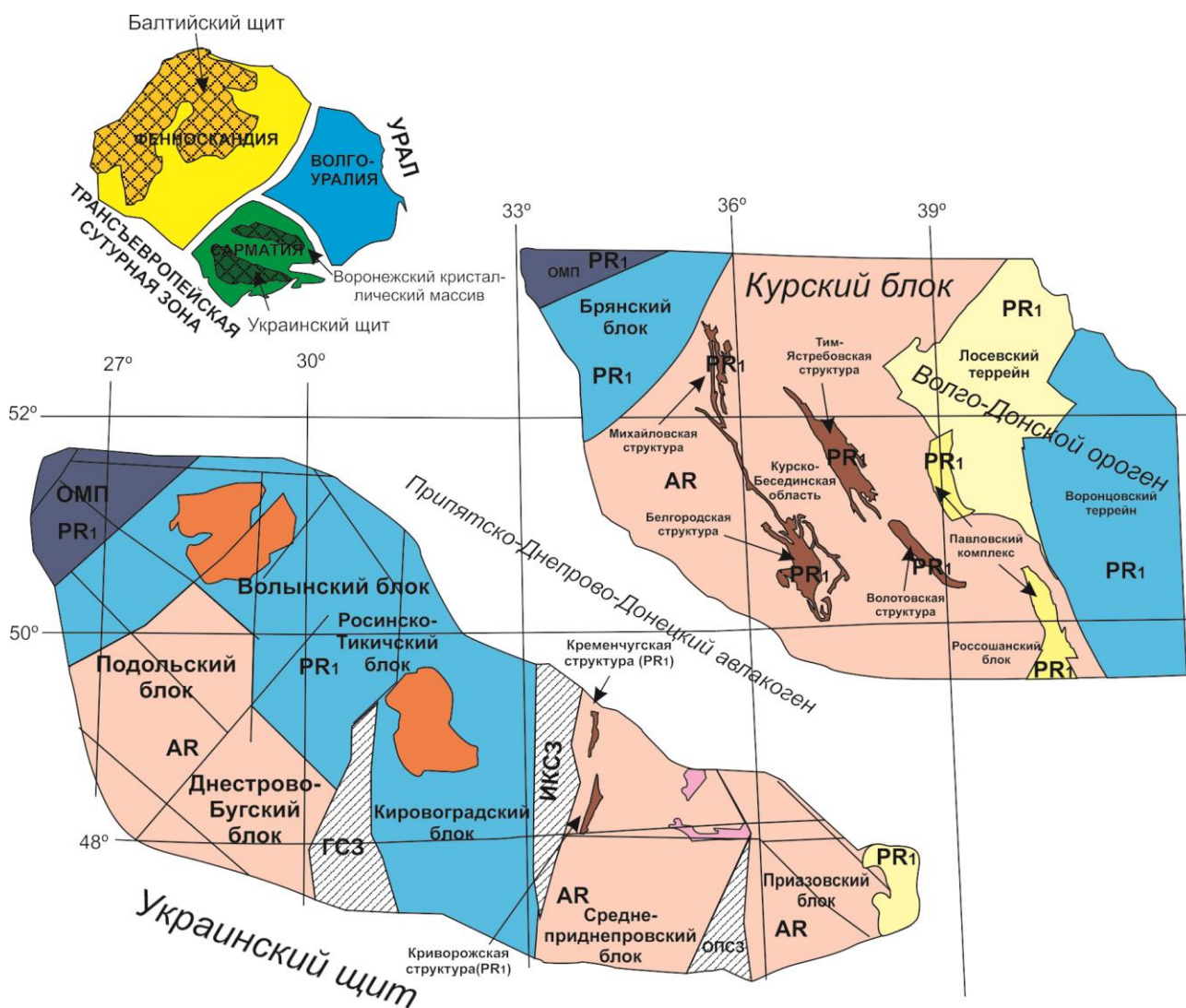


Рис. 1. Схематическая структурная карта Сарматии по [2]. Аббревиатуры: ГСЗ – Голованевская сутурная зона, ИКСЗ – Ингулец-Криворожская сутурная зона, ОПСЗ – Орехово-Павлоградская сутурная зона, ОМП – Осницко-Микашевичский пояс. [Fig. 1. A sketch map of the Sarmatia after [2]. Abbreviations: NHS – Golovanevsk Suture Zone, ICSZ – Ingulets-Krivoy Rog Suture Zone, OPSZ – Orekhovo-Pavlograd Suture Zone, WMD – Osnitsk-Mikashевичи Igneous Belt.]

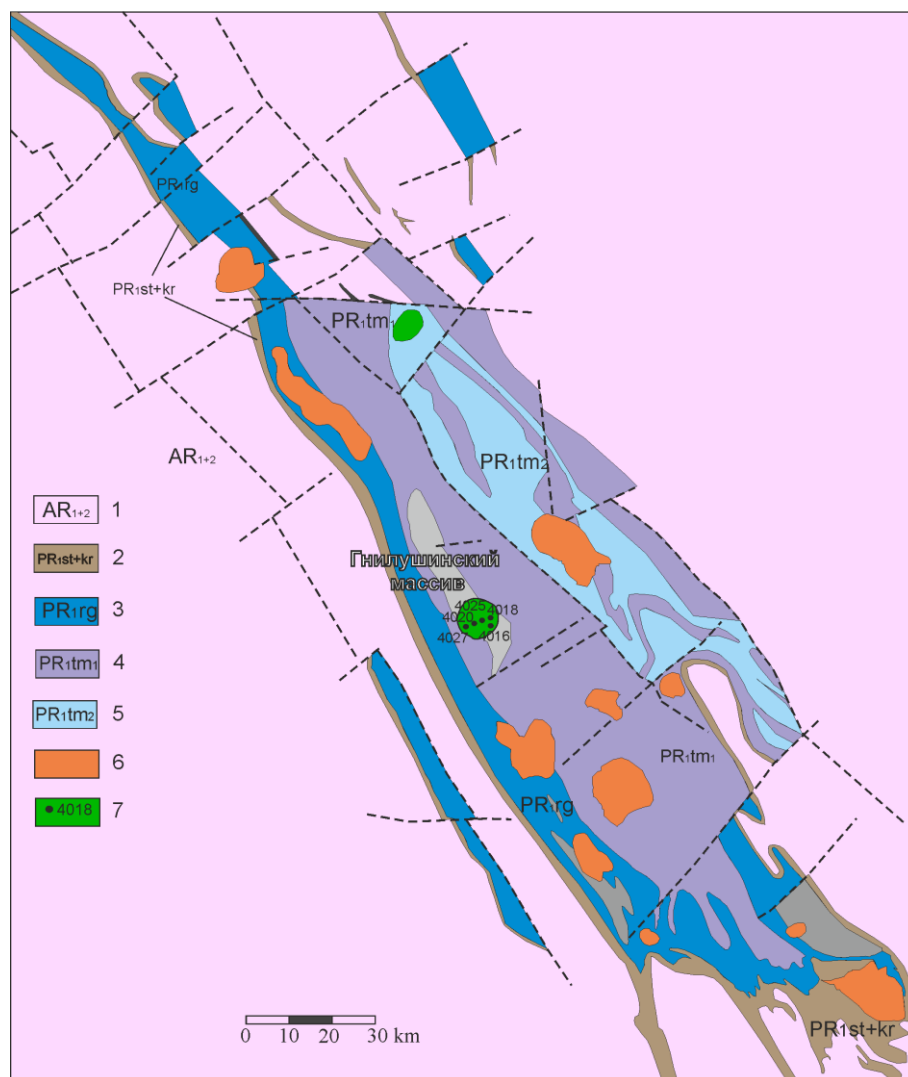


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Тим-Ястребовской структуры: 1 – ТТГ-ассоциация и метабазиты (AR_{1+2}); 2 – стойленская и коробовская свиты курской серии (PR_{1st+kr}); 3 – роговская свита оскольской серии (PR_{1rg}); 4 – нижняя подсвита тимской свиты оскольской серии (PR_{1tm_1}); 5 – верхняя подсвита тимской свиты оскольской серии (PR_{1tm_2}); 6 – гранитоиды стойло-николаевского комплекса, местоположение и номера пробуренных скважин; 7 – габброиды.

[Fig. 2. Schematic geological map of the Tim-Yastrebovka structure: (1) – TTG association and metabasites (AR_{1+2}); (2) – Stoilo and Korobki formations of the Kursk Group (PR_{1st+kr}); (3) – Rogovoe Formation of the Oskol Group (PR_{1rg}); (4) – lower subformation of the Tim Formation of the Oskol Group (PR_{1tm_1}); (5) – upper subformation of the Tim Formation of the Oskol Group (PR_{1tm_2}); (6) – Stoilo-Nikolaev Complex and drill-holes; (7) – gabbroids.]

Геологическая ситуация

Курский блок Сарматии состоит из Курско-Бесединского палеоархейского гранулит-гнейсового ядра и надвинутого на него около 2.8 млрд лет назад Михайловского мезоархейского гранит-зеленокаменного террейна [6]. После кратонизации мезоархейского фундамента и гранулитового метаморфизма с возрастом 2.8 млрд лет [7] в Сарматии в интервале 2.8–2.6 млрд лет назад широко был проявлен базитовый вулканизм [8, 9]. В конце архейской истории Курского блока произошло внедрение в кору внутриплитных калиевых высококремнистых гранитов и риолитов с возрастом 2.61 млрд лет [9, 10].

В раннепалеопротерозойской истории Курского блока был протяженный по времени платформенный этап, когда на архейской платформе в период 2.5–2.4

млрд лет назад накапливались мощные осадочные отложения карбонатных, терригенных пород и железисто-кремнистых формаций в условиях пассивной континентальной окраины [11] (рис. 1). Они имели площадное распространение, но сохранились от размыва только в узких линейных зонах, которые представляют собой континентальные рифты, заложившиеся в период 2.2–2.1 млрд лет назад. Наиболее крупные из них – Белгородско-Михайловская структура, Щигровско-Оскольская структура, включающая Тим-Ястребовскую и Волотовскую синформы. Они протягиваются более чем на 550 км при ширине 8–40 км.

На рубеже 2.14–2.10 млрд лет назад доминировали субдукционные процессы погружения океанической плиты Волго-Донского орогена под континентальную кору Курского блока, фиксируемые базаль-

товым магматизмом с возрастом 2.1 млрд лет, связанным с подъемом астеносферных расплавов в зоне деструкции субдцированной океанической плиты (slab-window) [12]. Около 2.07 млрд лет назад в результате масштабной коллизии континент-континент Волгоуралии и Сарматии в обстановке сжатия породы осадочные толщи и базальты подверглись складчатости и метаморфизму. Распад коллизионного орогена в период 2.07–2.04 млрд лет назад сопровождался плавлением нижней коры при внедрении базитовых магм в обстановке постколлизионного коллапса и деляминации литосферы [13]. Это явилось причиной объемного постколлизионного магматизма в Восточной Сарматии.

Геологическая позиция Гнилушинского массива

Гнилушинская интрузия находится почти в центре Тим-Ястребовской структуры и представляет собой штокообразный массив, имеющий округлую форму размером до 3 км в диаметре, площадью 9 км², вскрыт шестью картировочными скважинами 4016, 4018, 4020, 4022, 4025, 4027 более чем на 200 м в глубину (рис. 3). Массив в западной части прорывает карбонатные породы роговской свиты, в восточной – углеродистые сланцы тимской свиты. Вмещающие породы смяты в складки и подверглись метаморфизму в условиях высокотемпературной зеленосланцевой фации [14] с возрастом ~ 2.07 млрд лет [7] еще до внедрения Гнилушинской интрузии.

Контакты массива с вмещающими породами обычно крутые (около 80°), но в скважине 4016 они более пологие – около 45°. В геофизических полях массив проявлен в виде малоинтенсивной положительной гравитационной аномалии изометричной формы. В зависимости от соотношения полевых шпатов и темноцветных минералов в разрезах скважин можно выделить крупнозернистые биотит-роговообманковые габбро и габбро-диориты. Также отмечаются интервалы ороговикованных карбонатных пород (рис. 3), которые можно рассматривать, как крупные ксенолиты вмещающих доломитов роговской свиты.

В непосредственной близости от Гнилушинского массива в Тим-Ястребовской структуре находятся крупные диорит-гранодиоритовые интрузии (рис. 2) с возрастом 2.05–2.07 млрд лет [3, 4].

Аналитические методы исследований

Микрозондовые исследования проводились на растровом электронном микроскопе Jeol 6380 LV с энергодисперсионным анализатором INCA 250 (ЦКПНО ВГУ). Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1.2 мА, время набора спектра 70 сек, диаметр пучка 1–3 мкм. ZAF коррекция при расчете содержания окислов и оценка точности проводились с помощью комплекта программ математического обеспечения системы. Точность анализа систематически контролировалась по эталонным образцам природных и синтетических минералов.

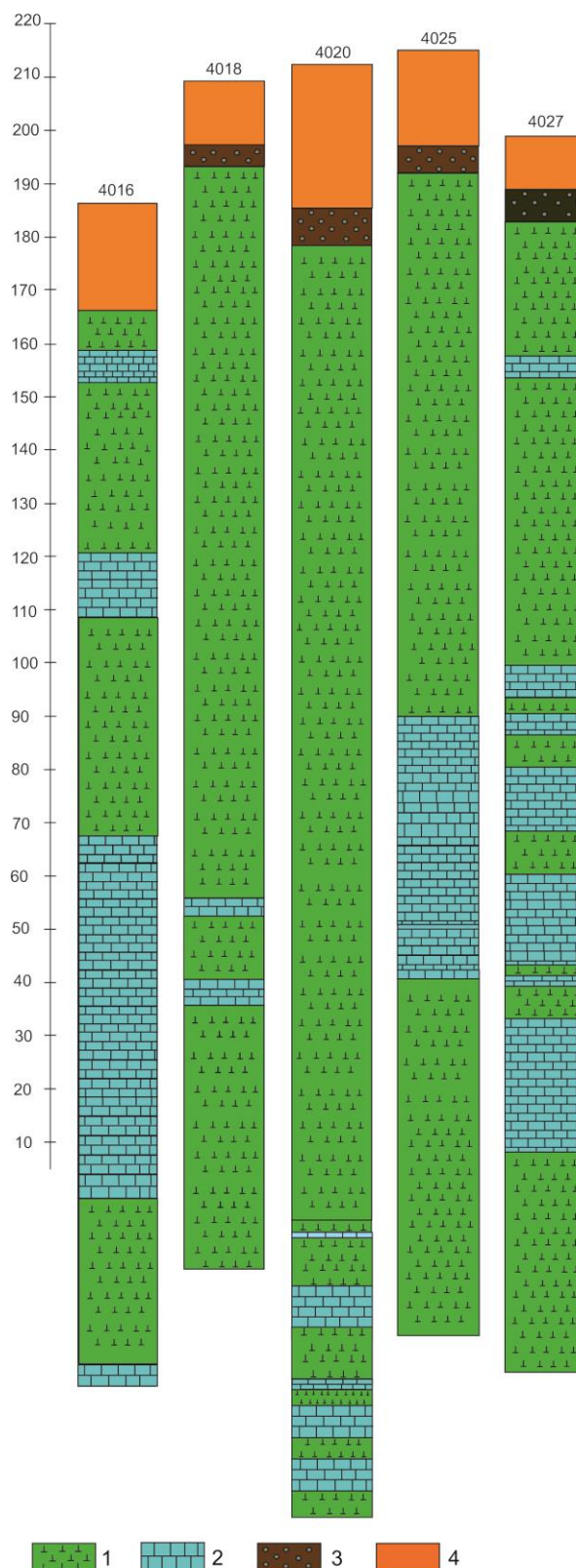


Рис. 3. Разрезы скважин, вскрывших габбро Гнилушинского массива: 1 – габброиды; 2 – ороговикованные доломиты; 3 – кора выветривания; 4 – породы фанерозойского осадочного чехла.

[Fig. 3. Sections of boreholes that exposed the gabbros of the Gnilushinsky massif: (1) - gabbroids; (2) – hornfelsed dolomites; (3) – weathering rind; (4) – phanerozoic sedimentary rocks.]

Определение содержаний главных элементов в породах выполнено для девяти образцов габбро на рентгено-флуоресцентном спектрометре S8 Tiger (Bruker AXS GmbH) в Воронежском государственном университете. Подготовка проб для анализа породообразующих элементов выполнена путем плавления 0.5 г порошка пробы, 2 г тетрабората лития в муфельной печи с последующим отливом стеклообразного диска. При калибровке спектрометра и для контроля качества измерений были использованы государственные стандартные образцы химического состава горных пород – ГСО №8871-2007, ГСО №3333-85, ГСО №3191-85. Точность анализа составляла 1–5 % отн. % для элементов с концентрациями выше 1–5 мас. % и до 12 отн. % для элементов с концентрацией ниже 0.5 мас. %.

Концентрации редких и рассеянных элементов определялись методом индукционно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием анализа (ICP-MS) в лаборатории ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург, аналитики В.А. Шишлов и В.Л. Кудряшов). Разложение образцов осуществляли по методике кислотного вскрытия, как в открытой, так и в закрытой системах. В качестве стандартного образца использовался внутрилабораторный аттестованный образец горной породы, разложенный по той же методике, что и реальные образцы. Пределы обнаружения элементов составили от 0.005–0.01 г/т для тяжелых и средних по массе элементов (U, Th, REE и др.) до 0.01–3 г/т для легких элементов (Ba, Rb и др.).

Sm-Nd изотопные исследования выполнены во ВСЕГЕИ на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI в статическом режиме. Коррекция на изотопное фракционирование неодима производилась с помощью нормализации измеренных значений по отношению $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$. Нормализованные отношения приводились к значению $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$ в международном изотопном стандарте JNdi-1. Погрешность определения содержаний Sm и Nd составляла 0.5 %, изотопных отношений $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} \pm 0.5$ %, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 0.002$ % (2σ). Уровень холостого опыта не превышал 10 пг для Sm и 20 пг для Nd. При расчете величин $\epsilon\text{Nd}(T)$ использовались современные значения однородного хондритового резервуара (CHUR) с параметрами $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$.

Выделение акцессорного циркона проводилось по стандартной методике с использованием тяжелых жидкостей. U-Th-Pb геохронологические исследования выполнены в ЦИИ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) на ионном микрозонде SHRIMP II по методике [15] с использованием эталонных цирконов “91500” и “Темога”. При расчетах использованы константы распада урана [16]. Поправки на нерadioгенный свинец введены по модели [17] на основе измеренных отношений $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Полученные результаты обработаны с помощью программы SQUID [18].

Петрография и минералогия

Роговообманковые габбро темно-зеленой до почти черной окраски, средне-, крупнозернистые, массивные. Структура аллотриоморфнозернистая, субофитовая, габбровая. Отмечаются ксенолиты ороговикованных доломитов. Минеральный состав (мод. %) плагиоклаз – 30–75 %, роговая обманка 30–50 %, биотит – 10–30 %. Акцессорные минералы представлены цирконом, апатитом, магнетитом, пирротинном.

Плагиоклаз образует полисинтетически сдвойникованные таблитчатые призматические кристаллы размером от 0.3 до 3 мм с отчетливой зональностью. От центральных частей кристаллов к краевым происходит резкое снижение содержания анортитового компонента от 84–93 % до 41–53 %.

Роговая обманка образует призматические и таблитчатые зерна размером от 0.3 до 5 мм по удлинению, от густо-зеленого до сине-зеленого цвета, умеренно глинозёмистые ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 4.8\text{--}10.3$ мас. %), низкотитанистые ($\text{TiO}_2 = 0.41\text{--}1.1$ мас. %), отвечают по составу магниальным роговым обманкам (рис. 4) [19].

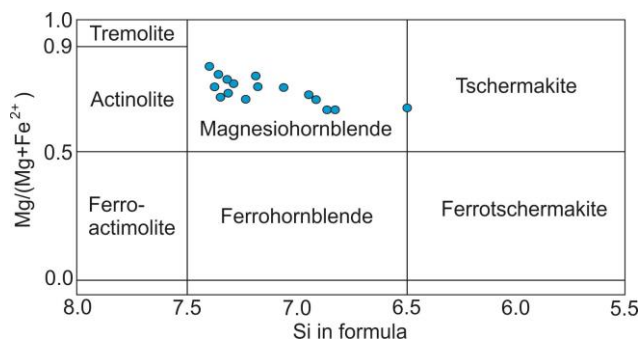


Рис. 4. Составы роговых обманок Гнилушинского массива на классификационной диаграмме $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}) - \text{Si}$.
[Fig. 4. Hornblende compositions of the Gnilushinsky massif on the $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}) - \text{Si}$ classification diagram.]

Биотит встречается в виде лейст размером 0.2–2.0 мм, которые плеохроируют от густо-буро-зеленого до светло-коричневого цвета. По составу биотит умеренно магниальный ($X_{\text{Mg}} = 0.59\text{--}0.68$), глинозёмистый ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.9\text{--}17.1$ мас. %) с невысокими содержаниями титана ($\text{TiO}_2 = 1.4\text{--}2.1$ мас. %).

Апатит является хлор-апатитом с небольшой примесью Sr (0.82 мас. %).

Геохимия

Роговообманковые габбро Гнилушинского массива имеют содержание SiO_2 от 46.6 до 52.4 мас. % и широкие вариации глинозёмистости – от умеренно ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.2\text{--}15.3$ мас. %) до высокоглинозёмистых ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 17.5\text{--}23.1$ мас. %) пород (табл. 1). Они имеют повышенные содержания щелочей ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 3.9\text{--}6.1$ мас. %) и фосфора ($\text{P}_2\text{O}_5 = 0.35\text{--}0.78$ мас. %) и характеризуются высокой магниальностью $\#Mg = 0.49\text{--}0.74$, причем наиболее магниальные различия отличаются меньшей глинозёмистостью. Они относятся к известково-щелочной серии (рис. 5 с). На дискриминантных диаграммах точки составов роговооб-

манковых габбро попадают в поля габбро и субщелочных габбро (рис. 5 а, б), и они также высоко калиевые (рис. 5 д).

По основному тренду изменения составов, выра-

женному обратной корреляцией $MgO - Al_2O_3$, среди габбро Гнилушинского массива (рис. 6 а) можно выделить две группы пород: (1) высокоглиноземистые и (2) магнезиальные.

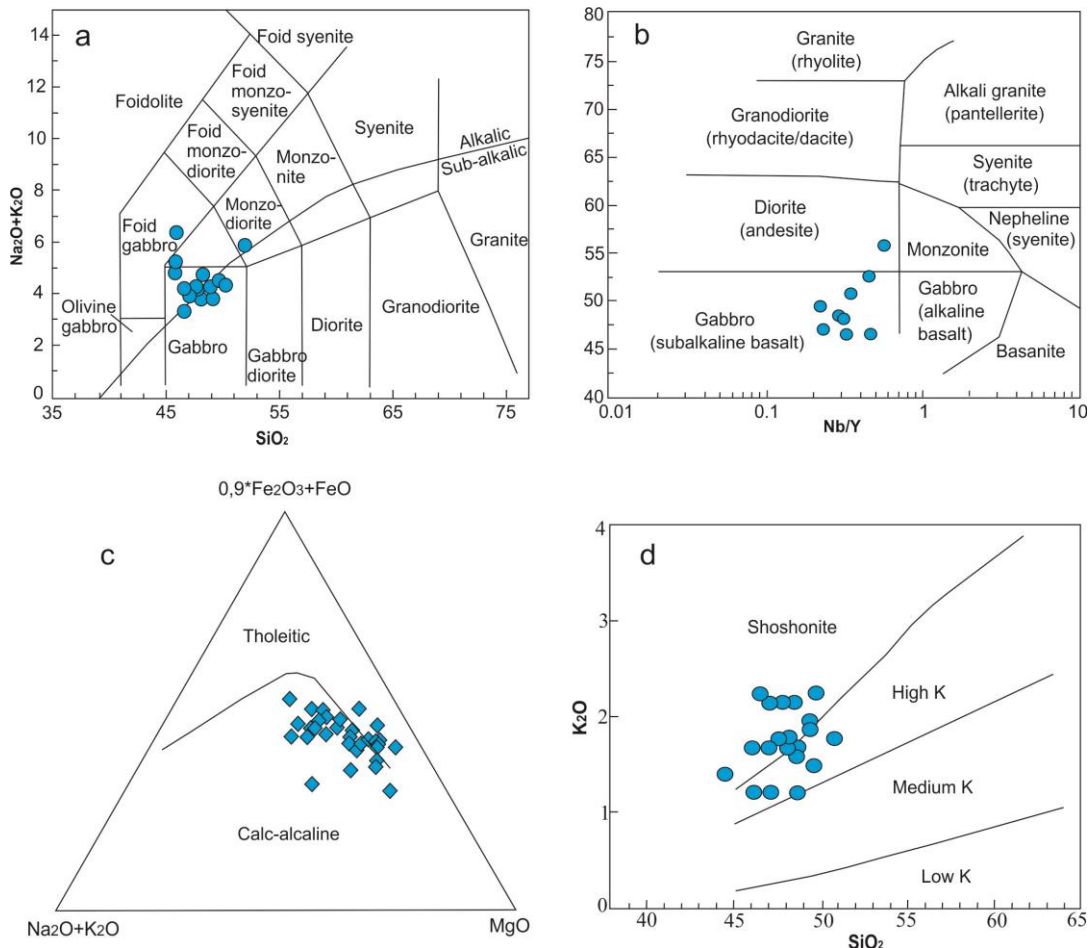


Рис. 5. Классификационные диаграммы габбро Гнилушинского массива: а) $Na_2O+K_2O - SiO_2$; б) $SiO_2 - Nb/Y$; в) $Na_2O+K_2O - MgO - 0,9*Fe_2O_3+FeO$; д) $K_2O - SiO_2$.

[Fig. 5. Classification diagrams of the gabbros of the Gnilushinsky massif: а) $Na_2O+K_2O - SiO_2$; б) $SiO_2 - Nb/Y$; в) $Na_2O+K_2O - MgO - 0,9 * Fe_2O_3 + FeO$; д) $K_2O - SiO_2$.]

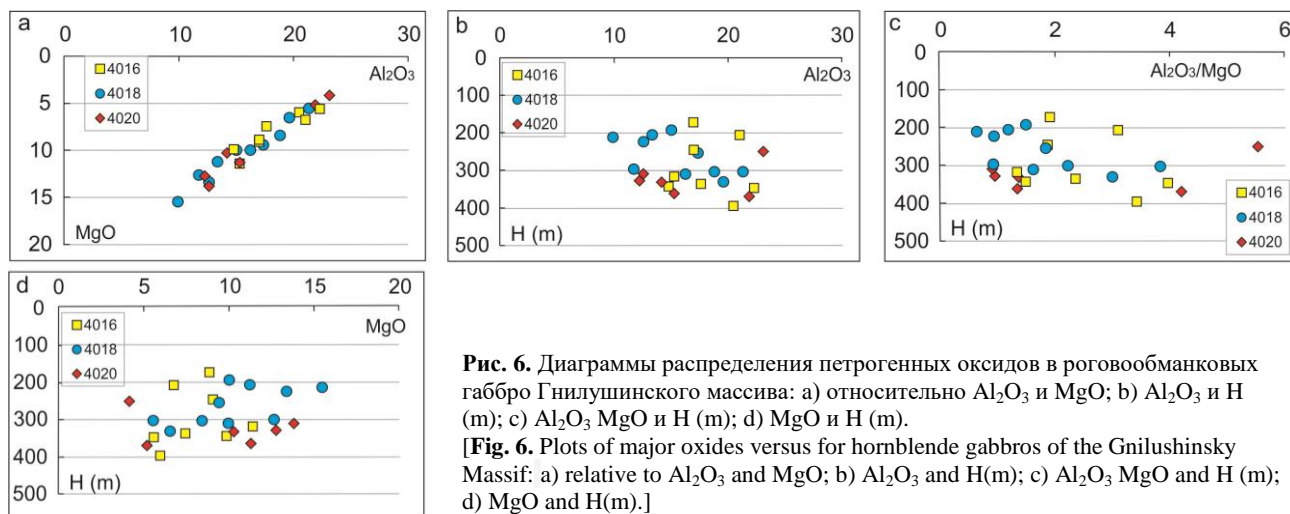


Рис. 6. Диаграммы распределения петрогенных оксидов в роговообманковых габбро Гнилушинского массива: а) относительно Al_2O_3 и MgO ; б) Al_2O_3 и H (m); в) Al_2O_3/MgO и H (m); д) MgO и H (m).

[Fig. 6. Plots of major oxides versus for hornblende gabbros of the Gnilushinsky Massif: а) relative to Al_2O_3 and MgO ; б) Al_2O_3 and H (m); в) Al_2O_3/MgO and H (m); д) MgO and H (m).]

Высокоглиноземистые габбро ($Al_2O_3 = 18\text{--}23$ мас. %) имеют пониженные содержания MgO (4.2–7.8 мас. %) Fe_2O_{3tot} , TiO_2 , Cr , Ni , Sc и других «мафических» элементов, обогащены литофильными – Ba (929–1820 мкг/г), Sr (752–1091 мкг/г) и всеми крупноионными высокочарядными элементами (рис. 7, табл. 1). Редкоземельные элементы (РЗЭ) сильно фракционированы с примерно равным обогащением легкими ($La_N/Sm_N = 2.2\text{--}4.1$) и обеднением тяжелыми ($Gd_N/Yb_N = 2.3\text{--}2.9$) лантаноидами и небольшой отрицательной или положительной Eu аномалией (рис. 7, табл. 1).

Магнезиальные габбро ($Al_2O_3 = 12\text{--}18$ мас. %, $MgO = 10.0\text{--}13.4$ мас. %) отличаются меньшим содержанием щелочей ($Na_2O+K_2O = 3.6\text{--}3.8$ мас.%) и фосфора ($P_2O_5 = 0.1\text{--}0.5$ мас. %). Они обогащены Fe_2O_{3tot} (7–10 мас. %), TiO_2 (0.7–1.0 мас. %), Cr (166–427 мкг/г) и Ni (41–72 мкг/г), содержат умеренные концентрации Ba (508–1079 мкг/г) и Sr (315–793 мкг/г), невысокие содержания высокочарядных элементов Zr , Nb и Ta , отличаются менее фракционированными и слабо обогащенными спектрами легких РЗЭ ($La_N/Sm_N = 1.3\text{--}1.9$; $Gd_N/Yb_N = 2.0\text{--}3.0$) и устойчивыми отрицательными Eu аномалиями (рис. 7, табл. 1).

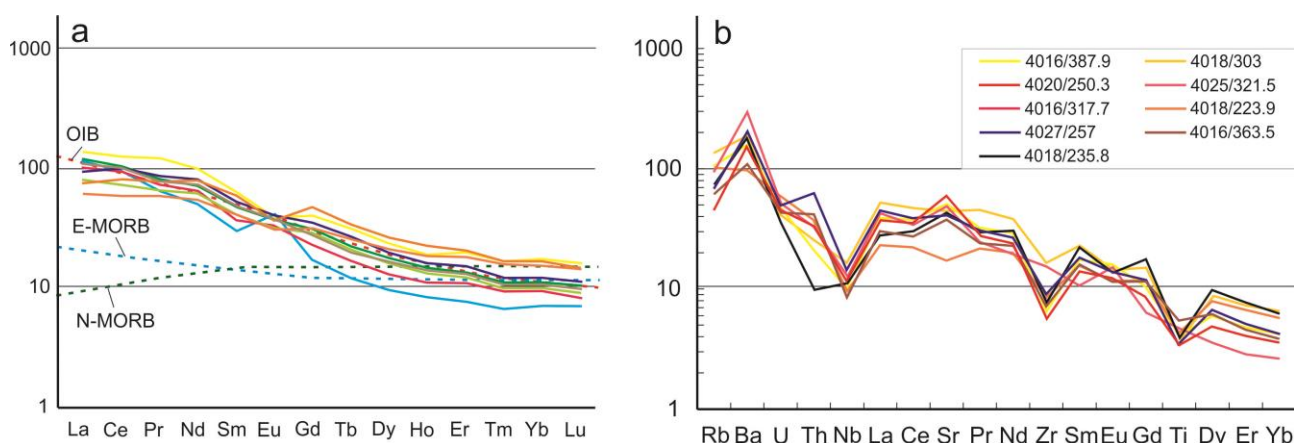


Рис. 7. Нормализованное к хондриту распределение редкоземельных (а) и нормализованное к примитивной мантии распределение малых и редких (б) элементов в роговообманковых габбро Гнилушинского массива.

[Fig. 7. Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized multi-element patterns (b) for the hornblende gabbros of the Gnilushinsky massif.]

Таблица 1. Содержания петрогенных окислов, редких и редкоземельных элементов в роговообманковых габбро Гнилушинского массива

[Table 1. Major oxides, trace and rare earth elements concentrations in the Gnilushinsky massif hornblende gabbros]

Скважина/ глубина [Drill hole/depth]	Высокоглиноземистые [High aluminous]					Магнезиальные [Magnesian]			
	4016/ 387.9	4018/ 303	4020/ 250.3	4025/ 321.5	4027/ 257	4016/ 317.7	4018/ 223.9	4016/ 363.5	4018/ 235.8
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO_2	46.60	49.24	47.51	50.76	52.39	47.91	49.15	48.24	46.76
TiO_2	0.67	0.65	0.63	0.82	0.65	0.82	0.75	0.99	0.71
Al_2O_3	19.36	21.32	23.10	17.52	19.75	15.29	12.62	12.24	18.04
Fe_2O_{3tot}	8.46	7.79	8.57	5.47	6.98	9.56	9.91	10.13	8.37
MgO	6.72	5.56	4.17	7.77	5.19	11.41	13.40	12.77	9.95
MnO	0.09	0.11	0.08	0.09	0.08	0.11	0.12	0.10	0.10
CaO	10.89	10.36	10.99	7.73	8.85	10.94	10.14	11.74	11.89
Na_2O	2.10	2.74	2.13	4.14	2.93	1.94	1.91	1.35	2.02
K_2O	1.83	1.84	2.10	1.94	2.58	1.73	1.91	2.24	1.66
P_2O_5	0.78	0.40	0.73	0.35	0.59	0.29	0.10	0.20	0.50
ППП [LOI]	1.55	1.14	1.00	2.91	1.16	0.98	1.53	0.00	1.13
Сумма [Total]	99.05	99.40	98.82	99.50	99.30	99.46	99.10	92.73	99.63
Na_2O/K_2O	1.14	1.49	1.01	2.13	1.14	1.12	1.00	0.60	1.21
K_2O+Na_2O	3.93	4.58	4.22	6.08	5.51	3.67	3.81	3.59	3.69

Продолжение Табл. 1
[Continued Table 1]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Li	21.4	17.1	20.3	23.3	18.4	16.0	14.8	18.6	22.2
Be	0.94	1.0	1.0	1.5	1.2	0.84	0.62	0.86	0.59
Sc	11.4	33.2	8.0	10.8	13.9	32.5	37.5	22.9	34.5
V	153	218	216	102	140	215	193	177	266
Cr	54.0	43.3	12.9	22.9	25.3	284	427	209	166
Co	29.4	31.0	16.4	15.4	23.6	41.6	72.0	39.3	42.2
Ni	30.8	15	10.4	16.6	34.2	121	241	86	71.9
Cu	60.8	41.9	50.9	75	60.6	71.9	239	58.2	98.8
Zn	65.0	80.1	70.0	55.8	60.6	64.3	74.2	74.3	67.2
Ga	18.6	19.9	20.4	16.4	17.2	15.5	13.6	16	17.5
Rb	55.7	72.3	24	52	36.3	33.5	55	32.9	39.5
Sr	901	801	1091	900	752	500	315	689	793
Y	17.9	30.0	15.0	11.1	18.8	22.9	26.4	17.9	29.1
Zr	65.9	158	53.8	147	86.2	77.8	83.7	70.6	75.6
Nb	6.3	10	7.1	6.5	8.8	7.4	5.9	5.3	6.9
Cs	1.7	1.6	1.8	1.8	1.7	1.1	1.9	1.1	1.3
Ba	1007	1149	929	1822	1216	508	588	662	1079
La	24.3	31.8	22.9	27.3	27.5	21.4	14.2	18	17.2
Ce	59.4	75	56.4	56.6	61.9	59.8	35.2	44.8	48.4
Pr	7.8	11	6.7	5.9	7.2	7.8	5.3	5.9	7.1
Nd	34.2	45.4	28.4	23.2	32.3	35.6	24	27	35.3
Sm	6.9	9	5.5	4.2	6.8	7.7	6	6	8.6
Eu	2.3	2.1	1.8	2.2	2	2.1	1.7	1.7	2
Gd	5.6	7.7	4.4	3.3	6	6.8	6	5.9	9.1
Tb	0.72	1.10	0.58	0.42	0.78	0.92	0.90	0.75	1.20
Dy	3.9	5.6	3.1	2.3	4.2	4.7	5	3.9	6.3
Ho	0.74	1	0.59	0.44	0.78	0.84	1	0.71	1.18
Er	2	3	1.7	1.2	2.1	2.3	2.8	1.9	3.2
Tm	0.26	0.41	0.23	0.16	0.27	0.29	0.38	0.24	0.41
Yb	1.7	2.7	1.5	1.1	1.7	1.9	2.4	1.6	2.6
Lu	0.24	0.39	0.2	0.17	0.25	0.27	0.35	0.22	0.35
Hf	2.4	4	1.8	3.4	2.5	3.4	2.9	2.3	2.4
Ta	0.89	0.55	1.5	0.73	0.71	0.66	0.51	0.45	0.48
Pb	6.7	5.9	6.8	10.2	11.1	6.1	4.2	6.4	4.7
Th	1.7	2.1	2.7	2.8	5.1	3.5	3.1	3.4	0.8
U	1	0.85	0.92	1.1	1	1.3	1.2	0.89	0.72
∑REE	150	196	134	128	154	152	105	119	143
∑LREE	135	174	122	119	138	134	86	103	119
Eu/Eu*	1.13	0.77	1.12	1.81	0.96	0.89	0.87	0.88	0.7
(Gd/Yb) _n	2.73	2.36	2.43	2.48	2.92	2.96	2.07	3.08	2.92
(La/Yb) _n	10.3	8.5	11.0	17.8	11.6	8.1	4.2	8.1	4.8
(La/Sm) _n	2.27	2.28	2.69	4.20	2.61	1.79	1.53	1.94	1.29
Sr/Y	50.3	26.7	72.7	81.1	40.0	21.8	11.9	38.5	27.3
Nb/Nb*	0.35	0.44	0.33	0.27	0.27	0.31	0.32	0.25	0.67
Th/Yb _(PM)	5.10	3.96	9.17	12.97	15.29	9.39	6.58	10.83	1.57

U-Pb геохронология по цирконам

Нами были выполнены определения возраста циркона на ионном микрозонде SHRIMP II из роговообманковых габбро Гнилушинского массива для пробы 4018/303 (скважина 4018, глубина 303 м). Циркон светло-коричневого цвета, полупрозрачный, представлен субидiomорфными удлиненными призматическими кристаллами, размером 80–150 мкм. В катодолюминесценции видна структура роста – темные,

почти черные, более высокоурановые (U = 342–1030 мкг/г) центральные части кристаллов часто с более светлыми низкоурановыми (U = 18–73 мкг/г) каймами (рис. 8, табл. 2). У некоторых зерен краевые части тоже темные и более высокоурановые, и светлые каймы кажутся внутренними зонами роста. Явных унаследованных ядер не выявлено. Структурные и морфологические признаки указывают на магматическую природу циркона и отсутствие наложенных событий.

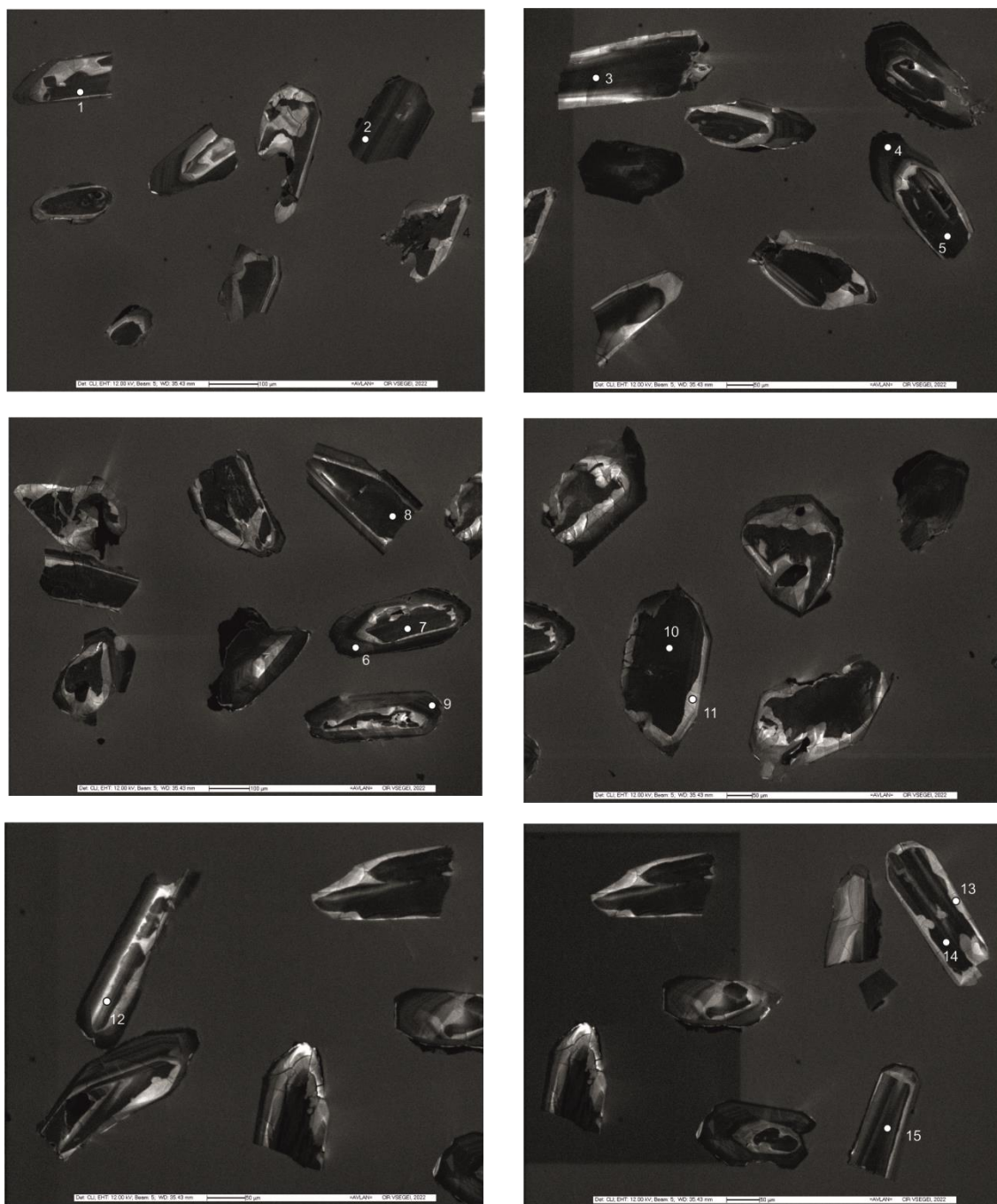


Рис. 8. Расположение точек определения возраста на CL снимках цирконов из роговообманковых габбро Гнилушинского массива. (Номера точек на рисунке соответствуют их номерам в табл. 2).
[Fig. 8. Cathodoluminescence images of zircon grains. Numbers of analytical points correspond to those in the Table 2.]

Было выполнено 15 анализов в 11 зернах (рис. 8, табл. 2). Анализировались центральные части, светлые каймы и краевые части кристаллов. Значительных различий между более темными высокоурановыми областями и светлыми низкоурановыми не выявлено. Было получено 14 конкордантных и субконкордантных оценок возраста ($|D| < 4\%$) циркона (табл. 2), по которым было рассчитан конкордантный возраст 2031 ± 8 млн лет, (СКВО = 0.19, вероятность конкордантности 0.66) (рис. 9).

Sm-Nd изотопные данные

Изотопный состав Nd был измерен в валовой пробе того же роговообманкового габбро 4018/303, для которого было выполнено изотопное датирование циркона. Значение $\epsilon_{Nd}(2031)$ составляет (-4.6), а модельный возраст $T_{Nd(DM)} = 2842$ млн лет (табл. 3) на 1.8 млрд лет более древний, чем U-Pb изотопный возраст циркона из этой породы, и свидетельствует о длительной предыстории мантийных источников расплавов.

Таблица 2. Результаты U-Pb изотопного датирования цирконов из габбро Гнилушинского массива
[Table 2. The results of U-Pb isotopic dating of zircons from the Gnilushinsky massif gabbros]

Точка [Spot]	% $^{206}\text{Pb}_c$	U, мкг/г [U, ppm]	Th, кг/г [Th, ppm]	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	мкг/г $^{206}\text{Pb}^*$ [ppm $^{206}\text{Pb}^*$]	(1) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст [(1) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age]	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст [(1) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age]	D, %	Общий $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ [Total $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$]	Общий $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ [Total $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$]	%	(1) $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	(1) $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	%	Корр. ошибка [Err. corr.]					
11.1	0.00	76	21	0.29	15.9	1410	25	2025	38	44	1.9	4.089	1.9	0.1248	2.1	4.21	2.9	0.2445	1.9	.673
12.1	0.07	88	21	0.24	26.9	1958	31	2034	30	4	1.9	2.815	1.9	0.126	1.7	6.14	2.5	0.355	1.9	.738
10.1	0.06	864	747	0.89	271	2005	25	2025	9.8	1	1.5	2.74	1.5	0.12522	0.53	6.273	1.6	0.3648	1.5	.935
2.1	0.04	368	73	0.20	116	2009	26	2037	14	1	1.5	2.733	1.5	0.12598	0.78	6.33	1.7	0.3658	1.5	.885
3.1	0.03	800	995	1.28	253	2019	25	2036.6	9.6	1	1.5	2.719	1.5	0.12578	0.54	6.366	1.6	0.3678	1.5	.937
9.1	0.07	307	65	0.22	97.5	2023	27	2042	16	1	1.5	2.71	1.5	0.1266	0.85	6.4	1.8	0.3687	1.5	.865
15.1	0.24	400	342	0.88	127	2025	26	2042	17	1	1.5	2.703	1.5	0.128	0.85	6.41	1.8	0.3691	1.5	.845
7.1	0.04	545	428	0.81	173	2029	26	2019	12	0	1.5	2.703	1.5	0.12469	0.65	6.34	1.7	0.3698	1.5	.916
6.1	0.11	272	59	0.22	86.7	2029	27	2022	18	0	1.6	2.7	1.6	0.1255	0.91	6.35	1.8	0.37	1.6	.843
5.1	0.08	503	448	0.92	161	2036	36	2032	12	0	1.5	2.691	1.5	0.12596	0.67	6.41	1.6	0.3714	1.5	.905
1.1	0.04	650	663	1.05	208	2040	26	2027	11	-1	1.5	2.686	1.5	0.12524	0.59	6.41	1.6	0.3722	1.5	.925
8.1	0.04	1058	1030	1.01	340	2046	25	2041	8.4	0	1.4	2.676	1.4	0.12624	0.46	6.482	1.5	0.3735	1.4	.950
14.1	0.03	639	545	0.88	205	2049	26	2039	11	0	1.5	2.672	1.5	0.12595	0.6	6.48	1.6	0.3741	1.5	.924
4.1	0.10	323	68	0.22	104	2056	27	2027	15	-1	1.5	2.659	1.5	0.1257	0.82	6.47	1.8	0.3757	1.5	.868
13.1	0.00	60	18	0.30	20.1	2109	44	2024	50	-4	2.4	2.583	2.4	0.1247	2.8	6.65	3.7	0.3871	2.4	.651

Примечание: ошибки 1σ. Pb_c и Pb* – первичный и радиогенный свинец, соответственно. Ошибка в стандартной калибровке 0.21–0.39%. (1) Первичный Pb скорректирован на измеренный ^{207}Pb . D, % - процент дискордантности.
[Note: errors are 1σ. Pb_c and Pb* are common and radiogenic lead, respectively. Standard calibration error is 0.21–0.39%. (1) Common Pb was corrected by measured ^{207}Pb . D, % is percent of discordance.]

Обсуждение результатов

Внутрикамерная дифференциация

По главным минералого-петрографическим и геохимическим особенностям можно сделать выводы об основных процессах кристаллизационной дифференциации роговообманковых габбро Гнилушинского массива. Широкие вариации составов массива обусловлены, вероятно, внутрикамерной дифференциацией базитового расплава. Главный устойчивый линейный тренд изменения составов, обратная корреляция MgO – Al₂O₃, проявлен при опробовании всех скважин из разных частей массива (рис. 7 а). Анализ распределения концентраций MgO и Al₂O₃ с глубиной в опробованных разрезах скважин не выявил четких трендов и показывает широкие вариации составов на интервалах как в первые метры, так и в сотню метров (рис. 7 b, c, d), что не дает оснований говорить о магматической расслоенности массива.

Высокоглиноземистые габброиды (Al₂O₃ до 23 мас. %), имеющие повышенные концентрации Na₂O, Sr, K₂O, Ba, P₂O₅, Nb, легких РЗЭ, вероятно, представляют остаточные расплавы. Магнезиальные габброиды (MgO до 13.4 мас. %), обогащенные Fe₂O₃, TiO₂, Cr и Ni, могут быть комплементарным кумулюсом.

Специфика дифференциации массива, вероятно, определялась высокими содержаниями воды в базальтовой магме, что не давало возможности кристаллизоваться плагиоклазу [21, 22]. Входящие в его состав компоненты накапливались в остаточном расплаве. Поэтому общий известково-щелочной тренд дифференциации габбро обусловлен кристаллизацией роговой обманки и рудной фазы (магнетит). Поскольку роговая обманка имеет контрастные коэффициенты распределения для легких и средних РЗЭ в базальтовых расплавах K_DLa = 0.20, K_DSm = 1.02 [23], ее присутствие в кумулусе могло обеспечивать наблюдаемый рост концентраций и степени фракционирования легких РЗЭ в высокоглиноземистых «остаточных» расплавах массива (рис. 6 а).

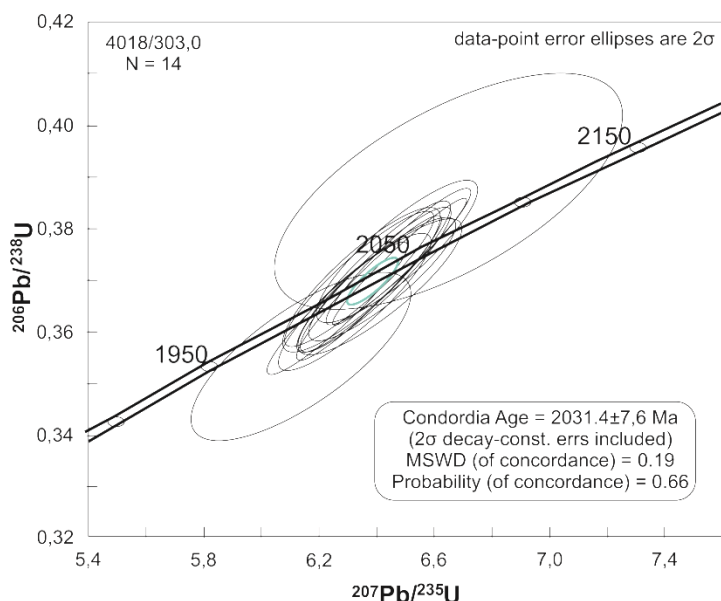


Рис. 9. Результаты U-Pb датирования циркона из роговообманковых габбро Гнилушинского массива методом SIMS.

[Fig. 9. The results of U-Pb SIMS analyses of zircons from the hornblende gabbros of the Gnilushinsky Massif.]

Таблица 3. Sm-Nd изотопные данные для габбро Гнилушинского массива
[Table 3. Sm-Nd isotopic data for the Gnilushinsky massif gabbros]

Номер образца [Sample]	Sm, мкг/г [Sm, ppm]	Nd, мкг/г [Nd, ppm]	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}^*$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	T**, млн лет [T**, Ma]	$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$	T _{Nd} (DM)***
4018/303	8.20	42.50	0.1166	0.51133	2031	-4.6	2842

* Погрешность $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ принята не более 0.2 %. ** Возраст по данным U-Pb датирования (настоящая статья). *** Модельный возраст по [20].
[* $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ considered no more than 0.2 %. **U-Pb age according to U-Pb dating (this paper). *** Model age according to [20].]

Коровая контаминация

Умеренное обогащение легкими РЗЭ на нормализованных к хондриту спайдер-диаграммах и отрицательные аномалии Nb на мультиэлементной диаграмме, нормированной к примитивной мантии (рис. 6 а, б) предполагает коровую ассимиляцию по пути движения базитовой магмы [24, 25]. С другой стороны, высокая степень коровой контаминации обычно сопровождается положительными аномалиями Zr, которых не наблюдается в габбро Гнилушинского массива. Кроме того, значение отношения $(\text{Th}/\text{Yb})_{\text{PM}}$ является чувствительным индикатором коровой контаминации, так как Th присутствует в мантийных породах на уровне ppb по сравнению с уровнями ppm в земной коре. Среднее значение отношения $(\text{Th}/\text{Yb})_{\text{PM}} = 9.5$ в роговообманковых габбро намного ниже, чем в верхней коре [$(\text{Th}/\text{Yb})_{\text{PM}} = 30$] [26] и вмещающих сланцах Тимской свиты [$(\text{Th}/\text{Yb})_{\text{PM}} = 39.9$ (среднее значение)] [27]. Это указывает на низкую степень коровой контаминации базитовых расплавов. Об этом также может свидетельствовать отсутствие унаследованных ядер в цирконе.

Здесь можно добавить, что вмещающими Гнилушинский массив породами являются преимущественно доломиты роговской свиты, ксенолиты которых разного размера часто наблюдаются в роговообманковых габбро. Доломиты являются очень тугоплавки-

ми породами и, скорее всего, не могли контаминировать базитовый расплав.

Источники расплавов и тектоническая позиция

Реконструируемые петрологические условия зарождения расплавов Гнилушинского массива за счет древней метасоматизированной мантии требуют источника тепла, инициировавшего ее плавление. Возраст габброидов 2030 млн лет указывает на их сопряженность с постколлизийным этапом тектонической эволюции восточной Сарматии [3, 13], так что плавление метасоматически переработанной литосферной мантии могло обеспечиваться за счет подъема астеносферы при отрыве субдуцированной плиты и/или распаде коллизийного орогена. Мантийный источник, судя по низкорациогенному изотопному составу Nd, был обогащен еще в архее. Возможно, вторым эпизодом его обогащения была переработка слэба в период 2.14–2.10 млрд лет назад в результате субдукции.

Ранее нами было установлено, что базальтовый магматизм с возрастом 2.1 млрд лет был связан с подъемом астеносферных расплавов в зоне деструкции субдуцированной океанической плиты (slab window) [12]. Распад коллизийного орогена начался после коллизии Сарматии и Волгоуралии около 2.07 млрд лет назад и сопровождался активным магматизмом [3, 13]. Палеопротерозойская тектоника в период 2.07–2.03 млрд лет назад, вероятно, наследовала об-

становку активной окраины, поскольку архейский Sm-Nd модельный возраст габбро указывает на приуроченность Гнилушинского массива к краю архейского блока.

Близкая постколлизийная обстановка формирования посттектонических габброидных массивов обсуждается для заключительного пермского этапа тектонической эволюции западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса [28, 29] в китайском Тянь-Шане. Материнские магмы для базитовых интрузий, в том числе и роговообманковых габбро, формировались при декомпрессионном плавлении «всплывающей» астеносферы и взаимодействии ее с литосферной мантией, подвергшейся метасоматической переработке при субдукции. Причиной их образования были отрыв слэба и/или деляминация утолщенной литосферы.

Выводы

1. Роговообманковые габбро Гнилушинского массива являются породами известково-щелочной серии, обогащенными легкими РЗЭ и литофильными элементами с устойчивой обратной корреляцией MgO – Al₂O₃. Высокоглиноземистые разности (Al₂O₃ до 23 мас. %) с повышенными концентрациями Sr и Ba представляют остаточные расплавы, а магнезиальные (MgO до 13.4 мас. %), обогащенные Fe₂O₃, Cr и Ni, могут быть комплементарным кумулусом.
2. Дифференциация насыщенного H₂O базитового расплава подавляла кристаллизацию плагиоклаза, и ее доминантой была кристаллизация роговой обманки, присутствие которой в кумулусе объясняет рост концентраций и фракционирование легких РЗЭ в высокоглиноземистых «остаточных» расплавах.
3. Возраст габбро 2030 млн лет указывает на их образование в постколлизийную стадию тектонической эволюции восточной Сарматии. Мантийный источник, вероятно, был метасоматизирован при переработке слэба при субдукции (2.14–2.10 млрд лет назад).
4. Постколлизийная тектоника, вероятно, наследовала обстановку активной окраины, поскольку архейский Sm-Nd модельный возраст габбро указывает на приуроченность Гнилушинского массива к краю Курского архейского блока.

Благодарности. Исследование было поддержано госбюджетной темой ИГЕМ РАН № 121041500222-4.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альбеков А.Ю., Рыборак М.В., Бойко П.С. Реперное U-Pb изотопное датирование палеопротерозойских габброидных формаций Курского блока Сарматии (Воронежский Кристаллический Массив) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2012. № 2. С. 84–94. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2012/02/2012-02-10.pdf>

2. Савко К.А., Самсонов А.В., Холин В.М., Базиков Н.С. Мегаблок Сарматия как осколок суперкратона Ваалбара: корреляция геологических событий на границе архея и палеопротерозоя // *Стратиграфия. Геол. корреляция.* 2017. Т. 25. № 2. С. 3–26. DOI: 10.7868/S0869592X17020065

3. Савко К.А., Самсонов А.В., Базиков Н.С., Козлова Е.Н. Палеопротерозойские гранитоиды Тим-Ястребовской структуры Воронежского кристаллического массива: геохимия, геохронология и источники расплавов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2014. № 2. С. 56–78. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2014/02/2014-02-09.pdf>

4. Савко К.А., Кориш Е.Х., Базиков Н.С., Цыбуляев С.В., Червяковский В.С., Холина Н.В., Хуссейн И. Палеопротерозойские гранодиориты I-типа Луневского массива в Курском блоке Сарматии: U-Pb возраст, изотопная систематика и источники расплавов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2021. № 4. С. 4–23. DOI: 10.17308/geology.2021.4/3787

5. Бойко П.С., Альбеков А.Ю., Рыборак М.В. Петролого-геохимические особенности габброидов золотухинского комплекса Курского блока ВКМ как индикаторы геодинамической обстановки его формирования // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2014. № 1. С. 47–53. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2014/01/2014-01-07.pdf>

6. Savko K.A., Samsonov A.V., Santosh M., Ovchinnikova M.Yu. Neoproterozoic-Palaeoproterozoic sedimentary basins in the Sarmatian Craton: global correlations and connections // *Journ. Geol.* 2021. Vol. 56. No. 9. P. 4479–4498. DOI: 10.1002/gj.4185

7. Savko K.A., Samsonov A.V., Kotov A.B., Salnikova E.B., Korish E.H., Larionov A.N., Anisimova I.V., Bazikov N.S. The Early Precambrian metamorphic events in Eastern Sarmatia // *Precambrian Research.* 2018. Vol. 311. P. 1–23. DOI: 10.1016/j.precamres.2018.04.009

8. Савко К.А., Цыбуляев С.В., Кориш Е.Х. Метабазиты Тим-Ястребовской и Авильской рифтогенных структур на восточной окраине Сарматии: геохимия, источники расплавов и геологические корреляции // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2016. № 2. С. 51–65. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2016/02/2016-02-08.pdf>

9. Савко К.А., Холина Н.В., Самсонов А.В., Кориш Е.Х., Червяковская М.В., Базиков Н.С., Ларионов А.Н. Петротип неоархейского атаманского комплекса гранитов Курского блока Сарматии: геохимия, геохронология, изотопная систематика // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2020. № 2. С. 20–43. DOI: 10.17308/geology.2020.2/2857

10. Savko K.A., Samsonov A.V., Kholina N.V., Larionov A.N., Zaitseva M.V., Korish E.H., Bazikov N.S., Terentiev R.A. 2.6 Ga high-Si rhyolites and granites in the Kursk Domain, Eastern Sarmatia: Petrology and application for the Archaean palaeocontinental correlations // *Precambrian Research.* 2019. Vol. 322. P. 170–192. DOI: 10.1016/j.precamres.2019.01.006

11. Savko K.A., Samsonov A.V., Larionov A.N., Chervyakovskaya M.V., Korish E.H., Larionova Yu.O., Bazikov N.S., Tsybulayev S.V. A buried Paleoproterozoic core of the Eastern Sarmatia, Kursk block: U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd isotope mapping and paleotectonic application // *Precambrian Research.* 2021. Vol. 353. P. 106021. DOI: 10.1016/j.precamres.2020.106021

12. Цыбуляев С.В., Савко К.А., Самсонов А.В., Кориш Е.Х. Палеопротерозойские рифтогенные вулканы ОИВ- и MORB-типа Курского блока восточной Сарматии: петроло-

- гия и геодинамика // *Петрология*. 2021. Т. 29. № 2. С. 136–171. DOI: 10.31857/S0869590321020060
13. Савко К.А., Самсонов А.В., Ларионов А.Н., Ларионова Ю.О., Базиков Н.С. Палеопротерозойские граниты А- и S-типов востока Воронежского кристаллического массива: геохронология, петрогенезис и тектоническая обстановка формирования // *Петрология*. 2014. Т. 22. № 3. С. 235–264. DOI: 10.7868/S0869590314030054
14. Савко К.А., Полякова Т.Н. Зональный метаморфизм и петрология метapelитов Тим-Ястребовской структуры, Воронежский кристаллический массив // *Петрология*. 2001. Т. 9. № 6. С. 593–611.
15. Larionov A.N., Andreichev V.A., Gee D.G. The Vendian alkaline igneous suite of northern Timan: ion microprobe U–Pb zircon ages of gabbros and syenite // *The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica*. Eds. Gee D.G., Pease V.L. London, Geol. Soc. London Mem. 2004. Vol. 30. P. 69–74. DOI: 10.1144/gsl.mem.2004.030.01.07
16. Steiger R.H., Jäger E. Subcommittee of geochronology: convention of the use of decay constants in geo- and cosmochronology // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1976. Vol. 36. No. 2. P. 359–362. DOI: 10.1016/0012-821X(77)90060-7
17. Stacey J.S., Kramers I.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1975. Vol. 26. No. 2. P. 207–221. DOI: 10.1016/0012-821X(75)90088-6
18. Ludwig K. SQUID 2: A User's Manual, rev. 12 Apr, 2009. Berkley Geochron. Ctr. Spec. Pub. 5, 2009, 110 p.
19. Leake B., Wooley A., Arps C., Birch W., Gilbert C., Grice J., Hawthorne F., Kato A., Kisch H., Krivovichev V., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Maresch W., Nickel E., Rock N., Schumacher J., Smith D., Stephenson N., Guo Y. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names // *Am. Mineral.* 1997. Vol. 82. P. 1019–1037. DOI: 10.1180/minmag.1997.061.405.13
20. Goldstein S.J., Jacobsen S.B. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: implications for crustal evolution // *Earth. Planet. Sci. Lett.* 1988. Vol. 87. P. 249–265. DOI: 10.1016/0012-821X(88)90013-1
21. Huang W.-L., Wyllie P.J. Phase relationships of gabbro-tonalite-granite-water at 15 kbar with applications to differentiation and anatexis // *Amer. Mineral.* 1986. Vol. 71. P. 301–316. URL: http://www.minsocam.org/ammin/AM71/AM71_301.pdf (дата обращения: 27.08.2022)
22. Pichavant M., Macdonald R. Crystallization of primitive basaltic magmas at crustal pressures and genesis of the calc-alkaline igneous suite: experimental evidence from St Vincent, Lesser Antilles arc // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2007. Vol. 154. P. 535–558. DOI: 10.1007/S00410-007-0208-6
23. Rollinson H., Pease V. Using geochemical data: to understand geological processes // Second edition. Cambridge, UK; New York, NY: Cambridge University Press, 2021. 661 p. DOI: 10.1017/9781108777834
24. McDonough W.F., McCulloch M.T., Sun S.S. Isotopic and geochemical systematics in Tertiary-Recent basalts from southeastern Australia and implications for the evolution of the subcontinental lithosphere // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1985. Vol. 49. P. 2051–2067. DOI: 10.1016/0016-7037(85)90063-8
25. Wilson M., Davidson J.P. The relative roles of crust and upper mantle in the generation of oceanic island arc magmas // *Royal Soc. London Phil. Transact., ser. A.* 1984. Vol. 310. No. 1514. P. 661–674. DOI: 10.1098/rsta.1984.0013
26. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust // *Treatise on Geochemistry*, Ed. Rudnick, R.L. Amsterdam, Elsevier. 2003. P. 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4
27. Кориш Е.Х., Савко К.А. Геохимия высокоуглеродистых сланцев Тим-Ястребовской структуры (Воронежский кристаллический массив) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2010. № 2. С. 108–116. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2010/02/2010-02-10.pdf> (дата обращения: 27.08.2022)
28. Jiang H., Chen H., Gong L., Zhang S., Chu G., Ai Y. Geochronology and geochemistry of a newly identified Permian hornblende gabbro suite in Aqishan–Yamansu Belt, eastern Tianshan, NW China: Implications on petrogenesis and tectonic setting // *Geol. Journ.* 2021. Vol. 56. P. 5506–5530. DOI: 10.1002/gj.4254
29. Song X.Y., Xie W., Deng Y.F., Crawford A.J., Zheng W.Q., Zhou G.F., Li J. Slab breakoff and the formation of Permian mafic-ultramafic intrusions in southern margin of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, NW China // *Lithos.* 2011. Vol. 127. P. 128–143. DOI: 10.1016/j.lithos.2011.08.011

Paleoproterozoic hornblende gabbro of the Gnilushinsky massif, the Kursk block, Sarmatia: geochronology, sources of melts and tectonic position

©2022 K. A. Savko¹✉, A. V. Samsonov², E. Kh. Korish¹,
V. D. Vakhnin¹, N. S. Bazikov¹, A. N. Larionov³, S. V. Tsybulyaev¹

¹*Voronezh State University, Universitetskaya sq., 1, Voronezh, 394018, Voronezh, Russian Federation*

²*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM) RAS, Moscow, Staromonetny per., 35, 109017, Moscow, Russian Federation*

³*Center for Isotope Research, All-Russian Geological Institute, Sredny Ave., 74, 199106, St. Petersburg, Russian Federation*

Abstract

Introduction: The Paleoproterozoic Tim-Yastrebovskaya synform of eastern Sarmatia contains gabbroid intrusions. The largest of them, the Gnilushinsky massif of hornblende gabbros, differs in age, mineralogy, and geochemistry from the gabbro-norites of the Zolotukhino complex. The purpose of this article was to determine the age, sources of melts and the tectonic position of the Gnilushinsky massif hornblende gabbros.

Methodology: We carried out geochemical, U-Pb, and Sm-Nd studies of the rocks from the Gnilushinsky massif to determine the age of formation and sources of basic melts.

Results and discussion: The gabbros of the Gnilushinsky massif are calc-alkaline rocks, enriched in light rare earth and lithophile elements with a negative MgO – Al₂O₃ correlation. High-alumina varieties represent residual melts, while magnesian ones can be complementary cumulus. The age of crystallization of the massif is 2031 Ma. It has a posttectonic position and a metasomatized mantle source.

Conclusions: Post-collision tectonics inherited the active margin setting, since the Archean Sm-Nd model age of gabbros indicates their position at the edge of the Kursk Archean block.

Keywords: Kursk block, Paleoproterozoic, hornblende gabbros, U-Pb isotope age, melt sources, subduction.

Funding: The study was supported by the Russian Academy of Sciences Program of Basic Research of the Institute of the Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry (IGEM) No. 121041500222-4.

For citation: Savko K. A., Samsonov A. V., Korish E. Kh., Vakhnin V. D., Bazikov N. S., Larionov A. N., Tsybulyaev S. V. Paleoproterozoic hornblende gabbro of the Gnilushinsky massif, the Kursk block, Sarmatia: geochronology, sources of melts and tectonic position. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 3, pp. 4–19. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/3/4-19>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Konstantin A. Savko, e-mail: ksavko@geol.vsu.ru

REFERENCES

1. Al'bekov A.Yu., Ryborak M.V., Boiko P.S. Reperno U-Pb izotopnoe datirovanie paleoproterozoiskikh gabbroidnykh formatsii Kurskogo bloka Sarmatii (Voronezhskii Kristallicheskii Massiv) [Fiducial U-Pb isotopic dating of the Kursk block of Sarmatia Paleoproterozoic gabbroid formations (Voronezh Crystalline Massif)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2012, no. 2, pp. 84–94. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2012/02/2012-02-10.pdf> (In Russ.)
2. Savko K.A., Samsonov A.V., Kholin V.M., Bazikov N.S. Megablok Sarmatija kak oskolok superkratona Vaalbara: korreljacija geologicheskikh sobytij na granice arheja i paleoproterozoja [The Sarmatia megablock as a fragment of the Vaalbara supercontinent: Correlation of geological events at the Archaean-Paleoproterozoic transition]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 3–26. DOI: 10.7868/S0869592X17020065
3. Savko K.A., Samsonov A.V., Bazikov N.S., Kozlova E.N. Paleoproterozoiskie granitoidy Tim-Yastrebovskoi struktury Voronezhskogo kristallicheskogo massiva: geokhimiya, geokhronologiya i istochniki rasplavov [Palaeoproterozoic granitoids of the Tim-Yastrebovskaya structure, Voronezh Crystalline Massif: Geochemistry, geochronology, and melt sources]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2014, no. 2, pp. 56–78. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2014/02/2014-02-09.pdf> (In Russ.)
4. Savko K.A., Korish E.Kh., Bazikov N.S., Tsybulyaev S.V., Chervyakovskiy V.S., Kholina N.V., Hussain I. Paleoproterozojskie granodiority I-tipa Lunevskogo massiva v Kurskom bloke Sarmatii: U-Pb vozrast, izotopnaja sistematika i istochniki rasplavov [Paleoproterozoic I-type granodiorites of the Lunevsky massif, Kursk Block, Sarmatia: U-Pb age, isotopic systematics and sources of melt]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 4, pp. 4–23. DOI: 10.17308/geology.2021.4/3787 (In Russ.)
5. Boiko P.S., Al'bekov A.Yu., Ryborak M.V. Petrologo-geokhimicheskie osobennosti gabbroidov zolotukhinskogo kompleksa Kurskogo bloka VKM kak indikatory geodinamicheskoi obstanovki ego formirovaniya [Petrological and geochemical specifics of the Zolotukhino complex gabbroids from Kursk block of Voronezh Crystalline Massif as indicators of its geodynamical settings of origin]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2014, no. 1, pp. 47–53. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2014/01/2014-01-07.pdf> (In Russ.)
6. Savko K.A., Samsonov A.V., Santosh M., Ovchinnikova M.Yu. Neoproterozoic-Palaeoproterozoic sedimentary basins in the Sarmatian Craton: global correlations and connections. *Journ. Geol.*, 2021, vol. 56, no. 9, pp. 4479–4498. DOI: 10.1002/gj.4185
7. Savko K.A., Samsonov A.V., Kotov A.B., Sahnikova E.B., Korish E.H., Larionov A.N., Anisimova I.V., Bazikov N.S. The Early Precambrian metamorphic events in Eastern Sarmatia. *Precambrian Research*, 2018, vol. 311, pp. 1–23. DOI: 10.1016/j.precamres.2018.04.009
8. Savko K.A., Tsybulyaev S.V., Korish E.Kh. Metabazity Tim-Yastrebovskoi i Avil'skoi riftogennykh struktur na vostochnoi okraine Sarmatii: geokhimiya, istochniki rasplavov i geologicheskie korrelyatsii [Tim-Yastrebovskaya and Avil'skaya riftogenic structures metabasites on the eastern margin of Sarmatia: geochemistry, melt sources and geological correlations]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2016, no. 2, pp. 51–65. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2016/02/2016-02-08.pdf> (In Russ.)
9. Savko K.A., Kholina N.V., Samsonov A.V., Korish E.Kh., Chervyakovskaya M.V., Bazikov N.S., Larionov A.N. Petrotip neoarhejskogo atamanskogo kompleksa granitov Kurskogo bloka Sarmatii: geohimija, geokhronologija, izotopnaja sistematika [The petrotype of the Neoproterozoic Atamansky granite complex (Kursk block, Sarmatia): geochemistry, geochronology, and isotopic taxonomy]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2020, no. 2, pp. 20–43. DOI: 10.17308/geology.2020.2/2857 (In Russ.)
10. Savko K.A., Samsonov A.V., Kholina N.V., Larionov A.N., Zaitseva M.V., Korish E.H., Bazikov N.S., Terentiev R.A. 2.6 Ga high-Si rhyolites and granites in the Kursk Domain, Eastern Sarmatia: Petrology and application for the Archaean palaeocontinental correlations. *Precambrian Research*, 2019, vol. 322, pp. 170–192. DOI: 10.1016/j.precamres.2019.01.006
11. Savko K.A., Samsonov A.V., Larionov A.N., Chervyakovskaya M.V., Korish E.H., Larionova Yu.O., Bazikov N.S., Tsybulyaev S.V. A buried Palaeoproterozoic core of the Eastern Sarmatia, Kursk block: U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd isotope mapping and paleotectonic application. *Precambrian Research*, 2021, vol. 353. DOI: 10.1016/j.precamres.2020.106021
12. Tsybulyaev S.V., Savko K.A., Korish E.H., Samsonov A.V. Paleoproterozojskie riftogennye vulkanity OIB- i MORB-tipa Kurskogo bloka vostochnoj Sarmatii: petrologija i geodinamika [Paleoproterozoic OIB- and MORB-type rift volcanics of the Kursk block, Eastern Sarmatia: petrology and geodynamics]. *Petrology*, 2021, vol. 29, no. 2, pp. 136–171. DOI: 10.31857/S0869590321020060 (In Russ.)
13. Savko K.A., Samsonov A.V., Larionov A.N., Larionova Y.O., Bazikov N.S. Paleoproterozojskie granity A- i S-tipov vostochnoj Voronezhskogo kristallicheskogo massiva: geokhronologija, petrogenezis i tektonicheskaja obstanovka formirovaniya [Paleoproterozoic A- and S-granites in the eastern Voronezh Crystalline Massif: Geochronology, petrogenesis and tectonic setting of origin]. *Petrology*, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 235–264. DOI: 10.7868/S0869590314030054 (In Russ.)
14. Savko K.A., Polyakova T.N. Zonal'nyj metamorfizm i petrologija metapelitov Tim-Yastrebovskoj struktury, Voronezhskij kristallicheskij massiv [Zonal metamorphism and petrology of metapelites in the Tim-Yastrebovskaya structure, Voronezh Crystalline Massif]. *Petrology*, 2001, vol. 9, no. 6, pp. 593–611 (In Russ.)
15. Larionov A.N., Andreichev V.A., Gee D.G. The Vendian alkaline igneous suite of northern Timan: ion microprobe U–Pb zircon ages of gabbros and syenite. *The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica. Eds. Gee D.G., Pease V.L.* London, Geol. Soc. London Mem. 2004, vol. 30, pp. 69–74. DOI: 10.1144/gsl.mem.2004.030.01.07
16. Steiger R.H., Jäger E. Subcommission of geochronology: convention of the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1976, vol. 36, no. 2, pp. 359–362. DOI: 10.1016/0012-821X(77)90060-7
17. Stacey J.S., Kramers I.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1975, vol. 26, no. 2, pp. 207–221. DOI: 10.1016/0012-821X(75)90088-6
18. Ludwig K. SQUID 2: A User's Manual, rev. 12 Apr, 2009. Berkeley Geochron. Ctr. Spec. Pub. 5, 2009, 110 p.
19. Leake B., Wooley A., Arps C., Birch W., Gilbert C., Grice J., Hawthorne F., Kato A., Kisch H., Krivovichev V., Linthout

- K., Laird J., Mandarino J., Maresch W., Nickel E., Rock N., Schumacher J., Smith D., Stephenson N., Guo Y. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *Am. Mineral*, 1997, vol. 82, pp. 1019–1037. DOI: 10.1180/minmag.1997.061.405.13
20. Goldstein S.J., Jacobsen S.B. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: implications for crustal evolution. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 1988, vol. 87, pp. 249–265. DOI: 10.1016/0012-821X(88)90013-1
21. Huang W.-L., Wyllie P.J. Phase relationships of gabbro-tonalite-granite-water at 15 kbar with applications to differentiation and anatexis. *Amer. Mineral*, 1986, vol. 71, pp. 301–316. URL: http://www.minsocam.org/ammin/AM71/AM71_301.pdf (accessed: 27.08.2022)
22. Pichavant M., Macdonald R. Crystallization of primitive basaltic magmas at crustal pressures and genesis of the calc-alkaline igneous suite: experimental evidence from St Vincent, Lesser Antilles arc. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2007, vol. 154, pp. 535–558. DOI: 10.1007/S00410-007-0208-6
23. Rollinson H., Pease V. Using geochemical data: to understand geological processes. Second edition. Cambridge, UK; New York, NY: Cambridge University Press, 2021. 661 p. DOI: 10.1017/9781108777834
24. McDonough W.F., McCulloch M.T., Sun S.S. Isotopic and geochemical systematics in Tertiary-Recent basalts from southeastern Australia and implications for the evolution of the sub-continental lithosphere. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 1985, vol. 49, pp. 2051–2067. DOI: 10.1016/0016-7037(85)90063-8
25. Wilson M., Davidson J.P. The relative roles of crust and upper mantle in the generation of oceanic island arc magmas. *Royal Soc. London Phil. Transact., ser. A*, 1984, vol. 310, no. 1514, pp. 661–674. DOI: 10.1098/rsta.1984.0013
26. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, Ed. Rudnick, R.L. Amsterdam, Elsevier, 2003, pp. 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4
27. Korish E.Kh., Savko K.A. Geokhimiya vysokouglerodistykh slantsev Tim-Yastrebovskoi struktury (Voronezhskii kristallicheskii massiv) [Tim-Yastrebovskaya structure (Voronezh Crystalline Massif) high-carbonaceous schists geochemistry]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2010, no. 2, pp. 108–116. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2010/02/2010-02-10.pdf> (accessed: 27.08.2022) (In Russ.).
28. Jiang H., Chen H., Gong L., Zhang S., Chu G., Ai Y. Geochronology and geochemistry of a newly identified Permian hornblende gabbro suite in Aqishan–Yamansu Belt, eastern Tianshan, NW China: Implications on petrogenesis and tectonic setting. *Geol. Journ.*, 2021, vol. 56, pp. 5506–5530. DOI: 10.1002/gj.4254
29. Song X.Y., Xie W., Deng Y.F., Crawford A.J., Zheng W.Q., Zhou G.F., Li J. Slab breakoff and the formation of Permian mafic-ultramafic intrusions in southern margin of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, NW China. *Lithos*, 2011, vol. 127, pp. 128–143. DOI: 10.1016/j.lithos.2011.08.011

Савко Константин Аркадьевич – д.г.-м.н., профессор, заведующий кафедрой полезных ископаемых и недропользования, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: ksavko@geol.vsu.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7291-7024>

Самсонов Александр Владимирович – д.г.-м.н., главный научный сотрудник Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Российская Федерация; e-mail: samsonov@igem.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4101-6159>

Корши Екатерина Хафисовна – ведущий инженер лаборатории комплексных исследований Воронежского государственного университета, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: korish_k@rambler.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6573-1272>

Вахнин Виталий Дмитриевич – магистрант кафедры полезных ископаемых и недропользования, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: Vakhnin.vitalik@mail.ru

Базиков Николай Сергеевич – к.г.-м.н., доцент кафедры полезных ископаемых и недропользования Воронежского государственного университета, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: nickolass@yandex.ru; ORCID 0000-0002-0847-6498

Ларионов Александр Николаевич – к.г.-м.н. старший научный сотрудник Центра изотопных исследований ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: alexander_larionov@vsegei.sp.ru

Цыбуляев Сергей Владимирович – преподаватель кафедры полезных ископаемых и недропользования Воронежского государственного университета, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: stsybulyaev@bk.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0335-5187>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Konstantin A. Savko – Dr.habil. in Geology and Mineralogy, Professor, Head of the Department of Mineral Resources and Mineral Management Studies, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: ksavko@geol.vsu.ru; ORCID 0000-0002-7291-7024

Alexander V. Samsonov – Dr.habil. in Geology and Mineralogy, Associate Member of the RAS, chief researcher, Institute of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russian Federation; e-mail: samsonov@igem.ru; ORCID 0000-0003-4101-6159

Ekaterina Kh. Korish – leading engineer, Integrated Research Laboratory, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: korish_k@rambler.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6573-1272>

Vitaly D. Vakhnin – master's degree student of the Department of Mineral Resources and Mineral Management Studies, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: Vakhnin.vitalik@mail.ru

Nikolay S. Bazikov – PhD in Geology and Mineralogy, associate professor, Department of Mineral Resources and Mineral Management Studies, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: nickolass@yandex.ru; ORCID 0000-0002-0847-6498

Alexander N. Larionov – PhD in Geology and Mineralogy, senior research fellow, Centre of Isotopic Research of A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: alexander_larionov@vsegei.sp.ru

Sergey V. Tsybulyaev – Lecturer, Department of Mineral Resources and Mineral Management Studies, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: stsybulyaev@bk.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0335-5187>

All authors have read and approved the final manuscript.