

СТАТЬЯ

УДК 552.3

DOI 10.17513/use.38535



CC BY 4.0

**ПЕТРОГРАФИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ БАЗИТОВ
И УСЛОВИЯ ИХ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ
НА ПРИМЕРЕ ГОРШЕЧЕНСКИХ ПЛУТОНОВ**¹Вахнин В. Д. ORCID ID 0009-0005-3920-5200, ²Базиков Н. С.¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки*«Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии
Российской академии наук», Москва, Российская Федерация, e-mail: vakhnin.vitalik@mail.ru;*²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный университет», Воронеж, Российская Федерация

Процесс коллизии между Сарматией и Волго-Уралией привел к формированию Волго-Донского орогена. Особое значение приобретает этап палеопротерозойского базитового магматизма ~2,05-2,07 млрд лет, непосредственно следующий за главной коллизионной фазой. Цель исследований – установить условия кристаллизации базитов Горшеченских плутонов в зоне сочленения Курского блока Сарматии и Волго-Донского орогена по полученным петролого-минералогическим данным. В северо-западной части Хохольско-Репьевского батолита находятся Горшеченские плутоны габбро и диоритов, которые вскрыты скважинами 7593, К-19 и К-47. Контакты между габбро и диоритами четкие, диориты прорывают габброиды. Один из плутонов, вскрытый скважиной К-19, прорывает павловские гранитоиды Олымского батолита. Другие два интрузива, вскрытые скважинами 7593 и К-47, прорывают гнейсы и амфиболиты донской серии. Методики изучения включают в себя микрозондовый анализ минералов, измерение содержаний главных элементов с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра, содержания малых и редких элементов в породах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, параметры кристаллизации были рассчитаны с помощью методики Putirka. По результатам петрографических и минералогических исследований выделены следующие породы Горшеченских плутонов: габбро, монцогаббро, монцодиориты и диориты. По результатам рассчитанных параметров кристаллизации и моделирования получили возможность показать условия кристаллизации пород Горшеченских плутонов: габбро кристаллизуются при $T = 1248-742\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1,2-0,46\text{ ГПа}$; диориты кристаллизуются при $T = 1170-719\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0,82-0,15\text{ ГПа}$. Полученные параметры позволяют охарактеризовать условия проявления базитового магматизма периода 2,05-2,07 млрд лет в зоне сочленения Курского блока Сарматии и Волго-Уралии.

Ключевые слова: палеопротерозой, параметры кристаллизации, габбро, монцогаббро, диориты, монцодиориты, Волго-Донской ороген

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарности А. А. Носовой и А. В. Каргину за актуальные, качественные консультации по теме статьи; К. А. Савко и Р. А. Терентьеву за предоставленные образцы.

**PETROGRAPHY, MINERALOGY, GEOCHEMISTRY OF BASIC ROCKS,
AND CONDITIONS OF THEIR CRYSTALLIZATION: A CASE STUDY
OF THE GORSHECHENSKY PLUTONS**¹Vakhnin V.D. ORCID ID 0009-0005-3920-5200, ²Bazikov N. S¹Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Ore Deposits Geology, Petrography,
Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russian Federation, e-mail: vakhnin.vitalik@mail.ru;²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
“Voronezh State University”, Voronezh, Russian Federation

The collision between Sarmatia and the Volga-Urals led to the formation of the Volga-Don Orogen. The stage of Paleoproterozoic mafic magmatism ~2.05-2.07 billion years ago, immediately following the main collisional phase, is of particular importance. The objective of this research is to establish the crystallization conditions of the Gorshechensky plutons' mafic rocks in the junction zone of the Kursk block of Sarmatia and the Volga-Don Orogen based on the obtained petrological and mineralogical data. The Gorshechensky plutons of gabbro and diorite are located in the northwestern part of the Khokholsko-Repyevsky batholith, penetrated by boreholes 7593, K-19, and K-47. Contacts between the gabbro and diorite are distinct, with the diorites intruding the gabbroids. One of the plutons, penetrated by borehole K-19, intrudes the Pavlovka granitoids of the Olymsky batholith. The other two intrusions, penetrated by boreholes 7593 and K-47, intrudes gneisses and amphibolites of the Don Group. Study methods include microprobe analysis of minerals, major element measurements using an X-ray fluorescence spectrometer, trace and rare element contents in the rocks were determined using inductively coupled plasma mass spectrometry, and crystallization parameters were calculated using the Putirka method. Based on the results of petrographic and mineralogical studies, the following rocks of the Gorshechensky plutons were distinguished: gabbro, monzogabbro, monzodiorite, and diorite. Based on the calculated crystallization parameters and modeling, it was possible to demonstrate the crystallization conditions of the Gorshechensky plutons: gabbro crystallizes at $T = 1248-742\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1.2-0.46\text{ GPa}$; diorite crystallizes at $T = 1170-719\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0.82-0.15\text{ GPa}$. The obtained parameters allow us to characterize the conditions of the manifestation of basic magmatism of the period 2.05-2.07 Ga in the junction zone of the Kursk block of Sarmatia and the Volga-Urals.

Keywords: paleoproterozoic, crystallization parameters, gabbro, monzogabbro, diorites, monzodiorites, Volga-Don orogen

Acknowledgments. The authors of the article express their gratitude to A. A. Nosova and A. V. Kargin for relevant and high-quality consultations on the topic of the article; to K. A. Savko and R. A. Terentyev for the provided samples.

Введение

Волго-Уралия рассматривается как отдельный кратонный блок или система микроконтинентов, которые в палеопротерозое двигались навстречу Сарматии [1; 2]. Процесс коллизии между Сарматией и Волго-Уралией привел к формированию Волго-Донского орогена [2]. Особое значение приобретает этап палеопротерозойского базитового магматизма ~2,05-2,07 млрд лет, непосредственно следующий за главной коллизией фазой [3]. Возрастная привязка дана по региональным аналогам [4]. Изучение пространственно-временной эволюции, состава и источников этих магматических комплексов (таких, как Горшеченские плутоны) позволяет количественно оценить термическую эволюцию в зоне тектонического шва на постколлизиионной стадии.

Цель исследования – установить условия кристаллизации базитов Горшеченских плутонов в зоне сочленения Курского блока Сарматии и Волго-Донского орогена по впервые полученным петролого-минералогическим данным.

Материалы и методы исследований

Волго-Донской ороген (ВДО) – складчато-надвиговый пояс, возникший около 2,0 млрд лет тому назад, занимает площадь около 300 000 км² (~500 км в ширину и ~600 км в длину) и располагается между архейскими протократонными Сарматским и Волго-Уральским блоками Восточно-Европейского кратона (рис. 1). Ороген сложен преимущественно ювенильными метаосадками. В его составе выделяют: Донской террейн, Лосевский и Воронцовский террейны [5].

Донской террейн (ДТ) расположен в юго-западной части ВДО и сложен породами донской серии, которые представлены метавулканиитами от андезибазальтов до дацитов (амфиболиты и гнейсы), мраморами и известково-силикатными породами [6; 7]. Прорывают породы донской серии обширные объемы гранитоидов павловского комплекса, который представлен Павловским батолитом ($2076 \pm 3,1$ млн лет) на юге ДТ, Хохольско-Репьевским ($2068 \pm 5,7$ млн лет) и Олымским (2059 ± 8 млн лет) батолитами в северной части ДТ (рис. 2) [8].

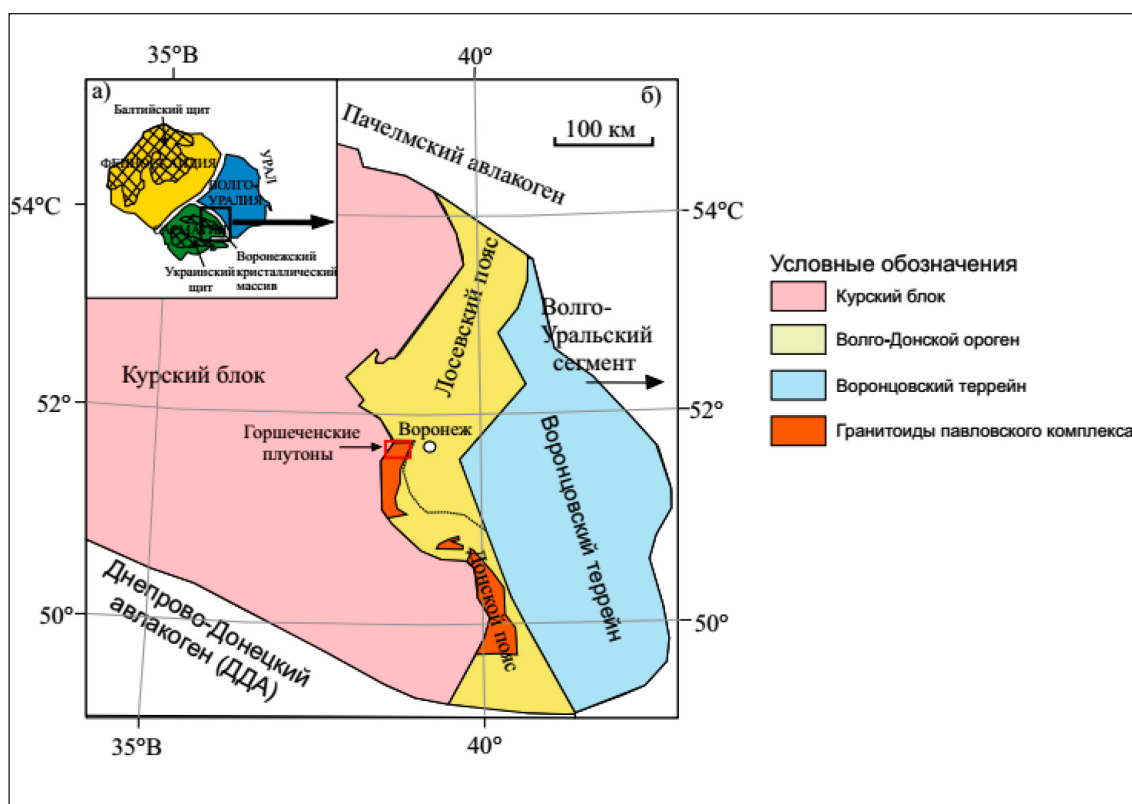


Рис. 1. Схематическая карта:

а) Восточно-Европейского кратона (составлено автором на основе источника [4; 6]);
б) Восточной Сарматии (составлено автором на основе источника [9])

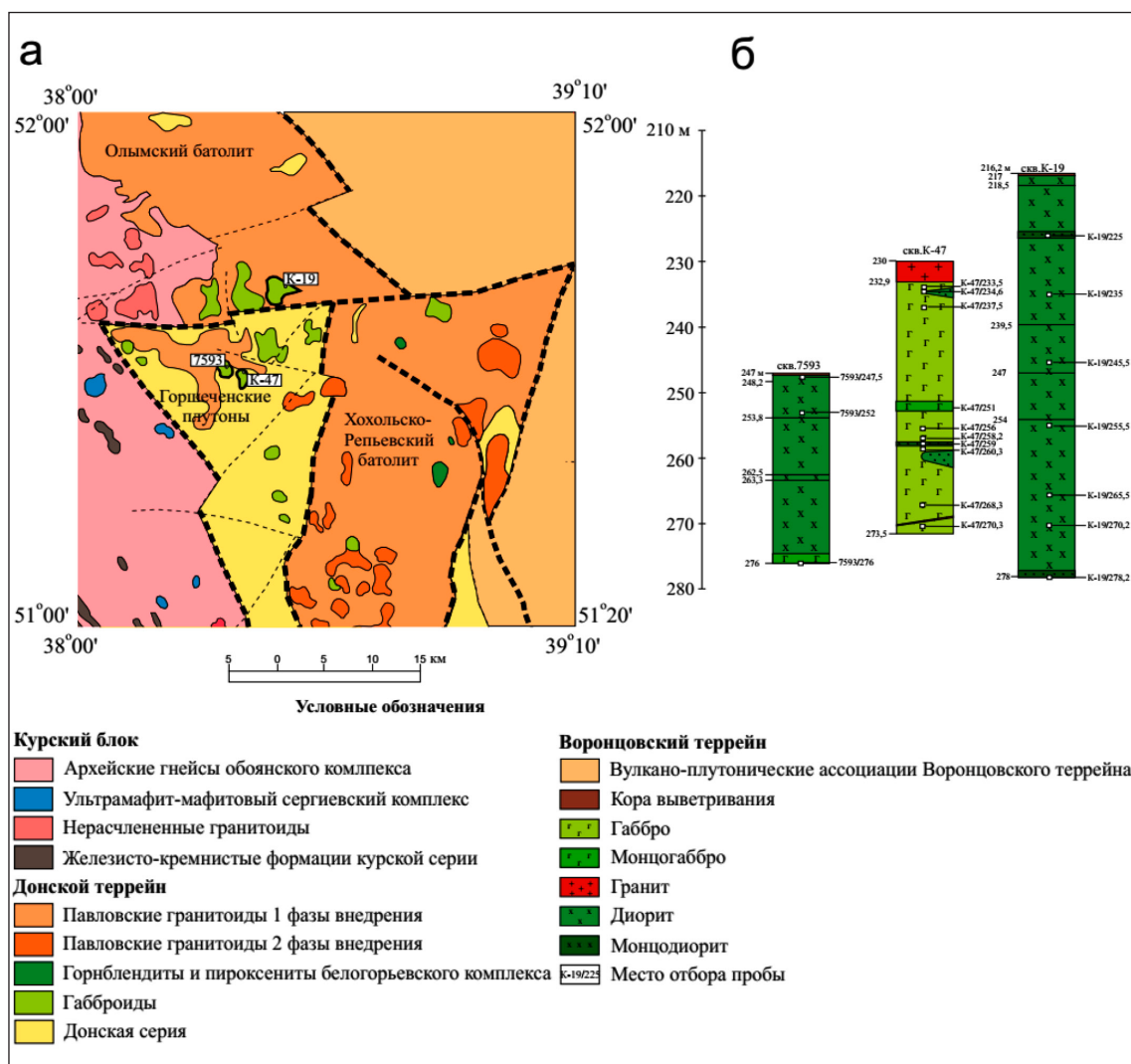


Рис. 2. Горшеченские плутоны: а) схематическая геологическая карта Горшеченских плутонов [9]; б) разрезы скважин, вскрывших породы Горшеченских плутонов (составлено авторами на основе данных, полученных в процессе исследования)

В северо-западной части Хохольско-Репьёвского батолита находятся Горшеченские плутоны габбро и диоритов, которые вскрыты скважинами 7593, К-19 и К-47 (рис. 2). Контакты между габбро и диоритами четкие. Один из плутонов, вскрытый скважиной К-19, прорывает павловские гранитоиды Олымского батолита. Другие два интрузива, вскрытые скважинами 7593 и К-47, прорывают гнейсы и амфиболиты донской серии.

Микрозондовый анализ минералов габбро и диоритов Горшеченских плутонов проводился на растровом электронном микроскопе Jeol 6380 LV, оснащённом энергодисперсионным спектрометром INCA 250 (ЦКПНО ВГУ). Исследования выполнялись при следующих условиях: ускоряющее

напряжение 20 кВ, сила тока пучка 1,2 мА, длительность сбора спектра 70 секунд, диаметр электронного луча 1-3 мкм. Для расчета содержания оксидов применялась коррекция по методике ZAF, точность которой оценивалась с использованием программного обеспечения системы. Надежность результатов проверялась путем регулярного контроля с применением стандартных образцов природных и синтетических минералов.

Содержание главных элементов в породах определялось для двадцати образцов габбро и диоритов с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра S8 Tiger производства компании Bruker AXS GmbH в Воронежском государственном университете. Подготовку проб осуществляли путём сплавления 0,5 г порошковой пробы с 2 г

тетрабората лития в муфельной печи, после чего формировался стекловидный диск. Калибровка прибора и контроль качества анализов производились с применением государственных стандартных образцов состава горных пород: ГСО № 8871–2007, ГСО № 3333–85, ГСО № 3191–85. Точность анализа составила 1-5% относительно измеряемого значения для элементов с концентрацией свыше 1-5% мас. и до 12% для элементов с концентрацией менее 0,5% мас.

Содержания малых и редких элементов в породах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в ИГЕМ РАН на XII ICP-MS Thermo Scientific масс-спектрометре. Калибровка чувствительности прибора по всей шкале масс осуществлялась с помощью стандартных 68-элементных растворов (ICP-MS-68A, HPS, растворы А и В), включающих все анализируемые в пробе элементы. Пределы обнаружения элементов составляли от 0,1 нг/г для тяжелых и средних по массе элементов до 1 нг/г для легких элементов. Погрешность анализа составляла 1-3 отн. %.

Параметры кристаллизации были рассчитаны с помощью методики Putirka [10; 11]. Использовались уравнения для расчета температур и давлений по ортопироксенам, клинопироксенам, плагиоклазам и амфиболам.

Результаты исследования и их обсуждение

Петрография и минералогия

Горшеченские плутоны сложены монцогаббро, габбро, диоритами и монцодиорита-

ми (рис. 3, табл. 1). Монцогаббро серо-зеленые, среднезернистые с массивной текстурой. Структура гипидиоморфнозернистая и габбровая. Габбро являются темно-серо-зелеными, мелкозернистыми и среднезернистыми породами массивной текстуры. Структура гипидиоморфнозернистая и аллотриоморфнозернистая, габбровая. Диориты – светлые зеленовато-серые породы массивной текстуры, мелко-среднезернистые, с гипидиоморфнозернистой структурой. Монцодиориты представлены темно-серо-зелеными породами, мелко-среднезернистыми, текстура массивная, структура гипидиоморфнозернистая.

Плагиоклаз в габбро образует идиоморфные и субидиоморфные полисинтетические сдвойникованные кристаллы (рис. 3). Выделяются зональные и незональные разности. В интерстициях незональных зерен плагиоклаза находится ксеноморфный калиевый полевой шпат (КПШ), а также есть включения эпидота. По размеру и форме зональные и незональные зерна не отличаются. Размер зерен плагиоклаза от 0,3 до 0,6 мм. В зональных и незональных зернах плагиоклаза наблюдается вторичный процесс мусковитизации. По данным микронзондового анализа незональные плагиоклазы относятся к олигоклазу ($An_{0,2-0,3}$). Зональные разности относятся к лабрадору ($An_{0,50-0,57}$) в центральных частях зерен, до андезина ($An_{0,4}$) в краевых (рис. 4, 5в). В диоритах плагиоклаз образует полисинтетически сдвойникованные идиоморфные и гипидиоморфные кристаллы (рис. 3).

Таблица 1

Минеральный состав пород Горшеченских плутонов

Порода/ минерал	Ортопироксен, мод. %	Клинопироксен, мод. %	Плагиоклаз, мод. %	Амфибол, мод. %	Биотит, мод. %	КПШ, мод. %	Кварц, мод. %	Рудные
Монцогаббро	–	10	50-55	30	10	–	–	Ильменит, магнетит, титанит, пирротин
Габбро	10	25-30	30-35	10-15	10-15	5	5	Пирротин, халькопирит, магнетит, титанит
Диориты	–	5	50-55	20-25	10-15	5	5-10	Пирротин, магнетит, титанит
Монцодиориты	–	–	60-65	15-20	10	5	–	Магнетит, титанит

Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в процессе исследования.

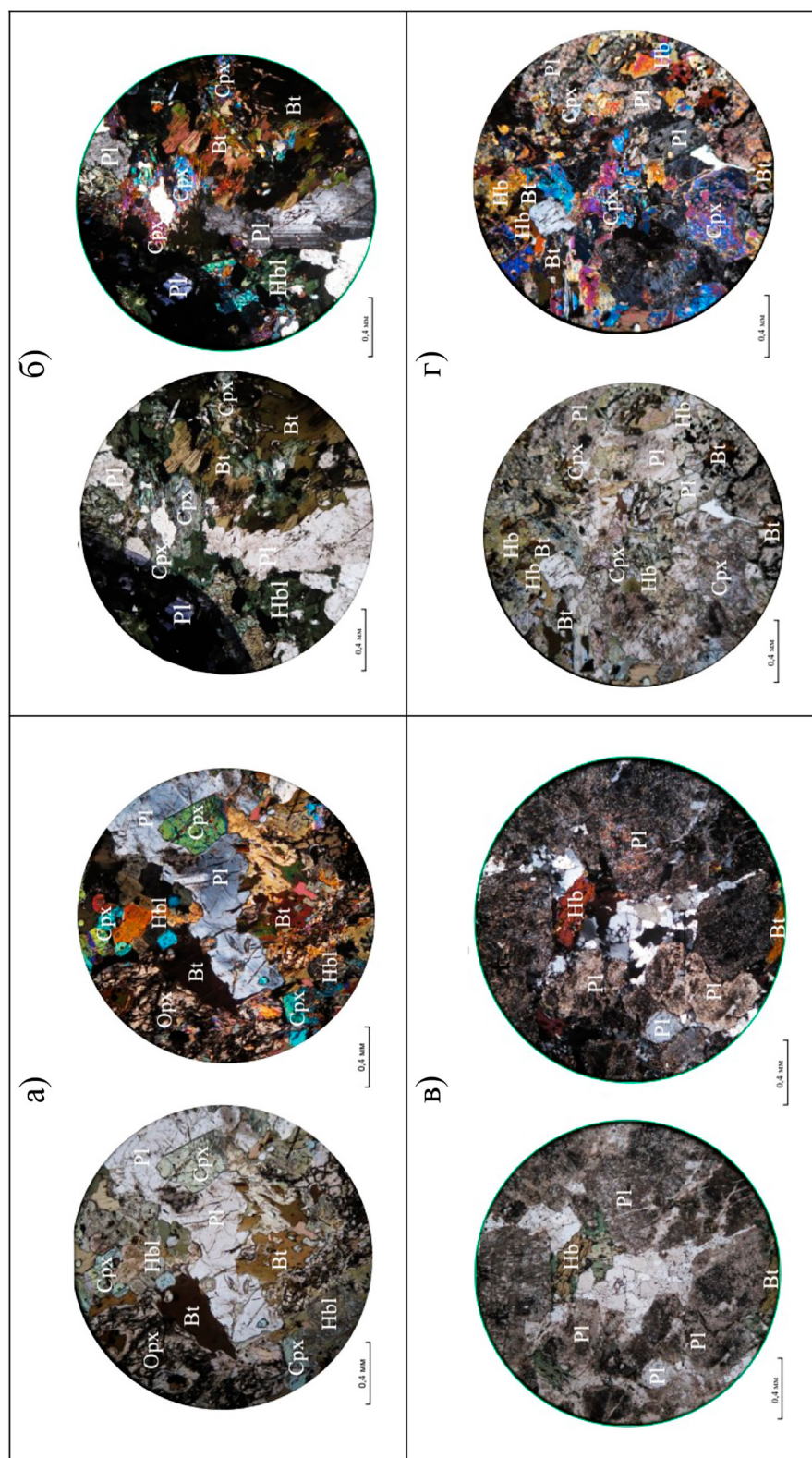


Рис. 3. Микрофотографии прозрачнополированных шлифов:

- а) габбро (обр. К-47/268,3; проходящий свет/скрещенные николи);
- б) диориты (обр. 7593/252; проходящий свет/скрещенные николи);
- в) монцодиориты (обр. К-19/278,2; проходящий свет/скрещенные николи);
- г) монцогаббро (обр. К-47/251; проходящий свет/скрещенные николи)

Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в процессе исследования

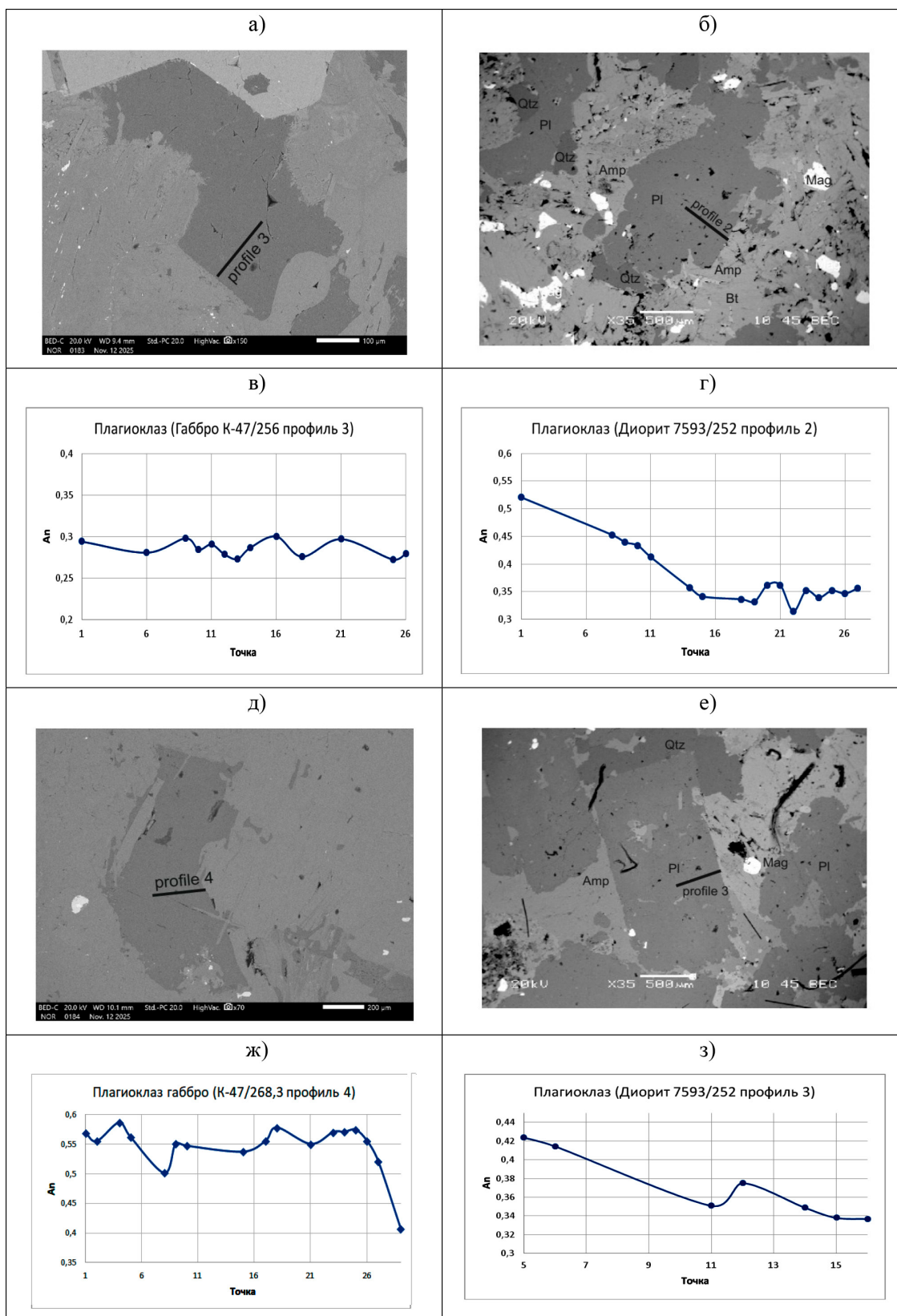


Рис. 4. Фотографии профилей плагиноклазов и графики распределения точек профилей для пород Горшеченских плутонов: габбро – а) и в) К-47/256 профиль 3; д) и ж) К-47/268,3 профиль 4; диориты – б) и г) 7593/252 профиль 2; е) и з) 7593/252 профиль 3. Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в процессе исследования

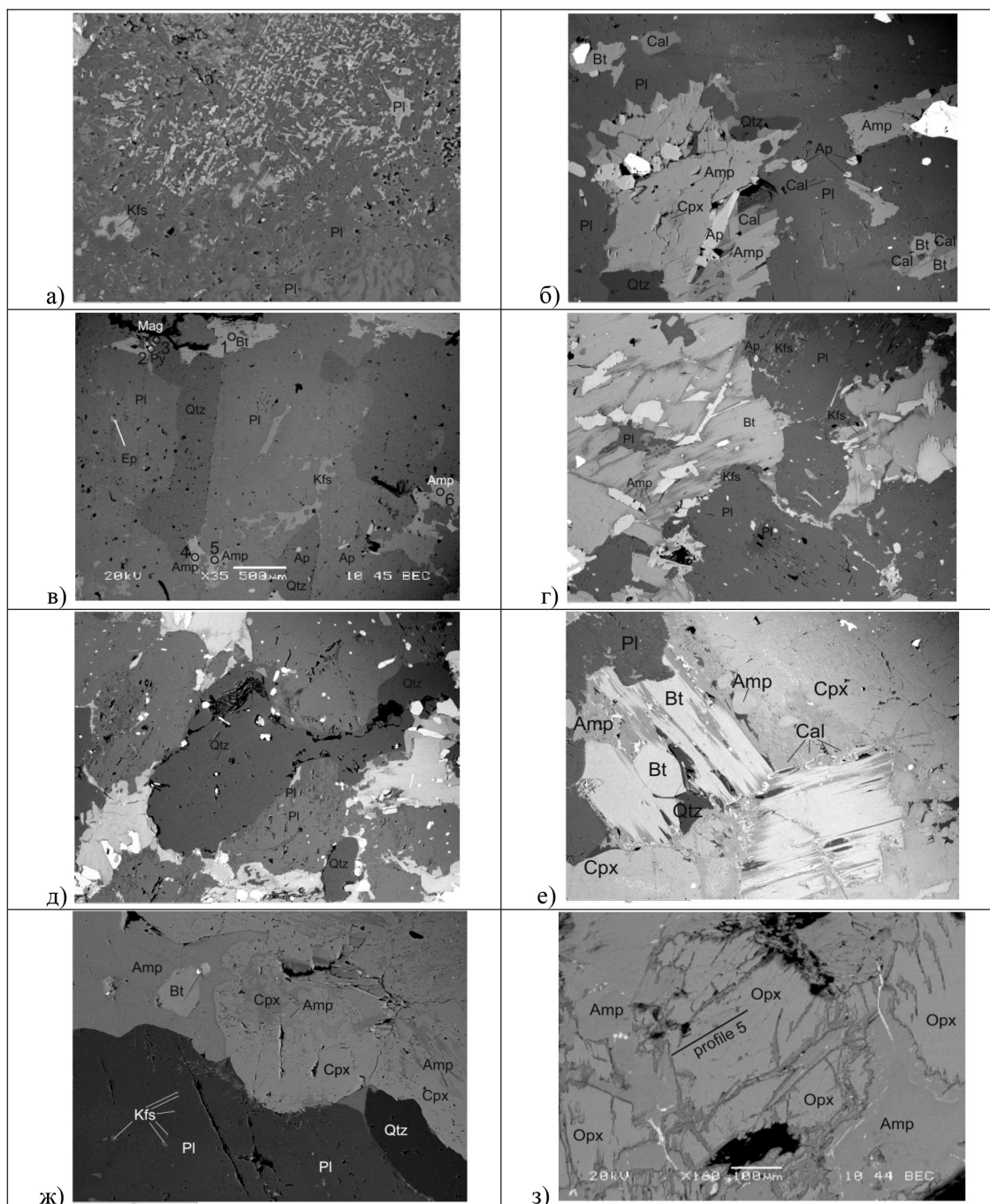


Рис. 5. Фотографии минералов в обратно отраженных электронах:

а) монцодиорит К-19/278,2; б) и в) диорит 7593/252;

г) и д) монцогаббро 7593/276; е) габбро К-47/256; ж) и з) габбро К-47/268,3

Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в процессе исследования

Выделяются зональные и незональные их разности. Зональные и незональные зерна окружены амфиболом, кварцем. В незональных зернах есть включения эпидота и КФШ. По размеру и форме зональные и незональные зерна не отличаются. Размер зерен плагиоклаза от 0,1 до 0,4 мм. Зональные зерна

по составу отвечают лабрадору ($An_{0,52-0,57}$) в центральных частях зерен, до андезина ($An_{0,31-0,45}$) в краевых (рис. 4, 5в). Незональные зерна относятся к андезину ($An_{0,34-0,42}$). В монцогаббро и монцодиоритах плагиоклаз образует идиоморфные и гипидиоморфные незональные кристаллы (рис. 3).

Размер зерен в монцогаббро от 0,2 до 0,4 мм, в монцодиоритах – 0,4-0,8 мм. По химическому составу они относятся к андезину ($An_{0,30-0,37}$) и олигоклазу ($An_{0,15-0,29}$).

Ортопироксен в габбро встречается в виде единичных зерен округлой формы, сильно трещиноватых (рис. 3). По зернам ортопироксена развивается вторичный актинолит в виде волокнистых и игольчатых агрегатов. Размер зерен ортопироксена составляет от 0,3 до 0,4 мм, по химическому составу они магнезиальные ($X_{Mg} = 0,62-0,70$), по данным микронзондового анализа относятся к энстатитам (рис. 5, 6).

Бледно-зеленовато-серый клинопироксен в габбро встречается в виде субидiomорфных зерен, по периферии зёрна замещаются актинолитом (рис. 3). Иногда клинопироксен образует включения в плагиоклазе. Клиннопироксен представлен зональными и незональными субидiomорфными зернами. Вокруг незональных зерен клинопироксена находятся ксеноморфные зерна плагиоклаза. Клиннопироксен в габбро представлен зональными и незональными

разностями. Зональные зерна имеют состав от диопсида в центральной части до авгита в краевой части. Незональные зерна относятся к диопсиду (рис. 4-6). Клиннопироксен в диоритах образует гипидiomорфные незональные зерна вытянутой формы, окруженные плагиоклазом (рис. 3), встречается в виде мелких реликтов размером до 0,1 мм, замещается актинолитом, по химическому составу относится к авгиту. Клиннопироксен в монцогаббро образует субидiomорфные незональные зерна, которые замещаются актинолитом (рис. 3), размер зерен 0,2-0,4 мм, образует только незональные зерна. По химическому составу относится к диопсиду и авгиту.

Амфибол в габбро, монцогаббро и диоритах представлен эденитом (рис. 3), который только в габбро образует гипидiomорфные и ксеноморфные зерна размером от 0,1 до 0,4 мм, образует сростания с биотитом, по составу магнезиальный ($X_{Mg} = 0,62-0,85$), с умеренным содержанием оксида алюминия ($Al_2O_3 = 5,68-11,13$ % мас.), оксида титана ($TiO_2 = 0,79-1,79$ % мас.) (рис. 4-6).

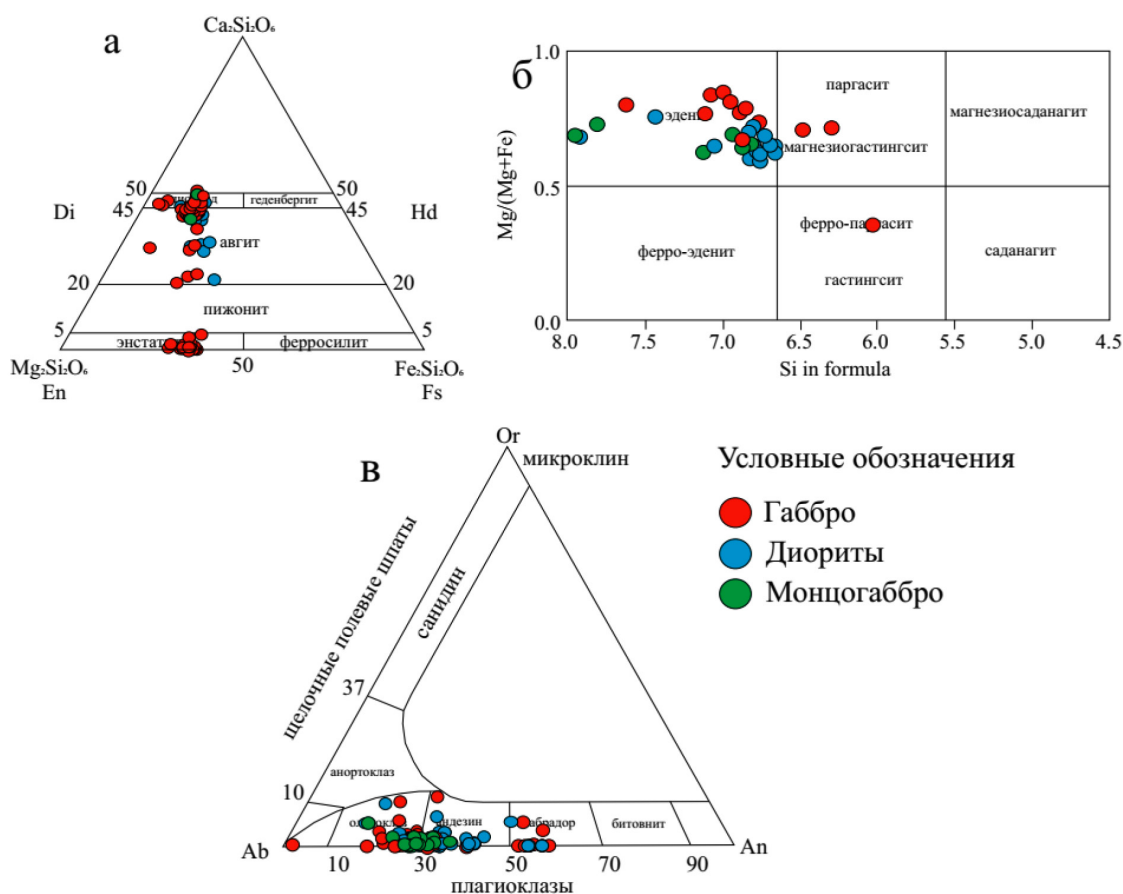


Рис. 6. Диаграммы: а) классификационная диаграмма Ca-Fe-Mg пироксенов Горшеченских плутонов; б) бинарная диаграмма MMA для классификации Са амфиболов; в) диаграмма составов полевых шпатов для пород Горшеченских плутонов
Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в процессе исследования [12; 13]

В монцогаббро эдениты представлены ксеноморфными зернами размером от 0,1 до 0,4 мм, по составу умеренно магнезиальные ($X_{Mg} = 0,62-0,69$), с умеренным содержанием оксида алюминия ($Al_2O_3 = 6,57-7,91$ % мас.), оксида титана ($TiO_2 = 0,48-1,42$ % мас.). В диоритах эдениты представлены ксеноморфными зернами размером от 0,2 до 0,7 мм, по составу умеренно магнезиальные ($X_{Mg} = 0,59-0,65$), с умеренным содержанием оксида алюминия ($Al_2O_3 = 6,84-8,52$ % мас.), оксида титана ($TiO_2 = 0,47-1,83$ % мас.) Местами развивается вторичный хлорит, присутствуют включения эпидота (рис. 4-6). В монцодиоритах эденит представлен гипидиоморфными зернами размером от 0,1 до 0,4 мм.

Биотит в габбро образует чешуйки коричневого цвета размером от 0,3 до 0,5 мм (рис. 3). Встречается в виде субидиоморфных и ксеноморфных зерен в сростании с плагиоклазом и кварцем и роговой обманкой. Биотит в диоритах образует крупные чешуйки, размером от 0,4 до 0,5 мм (рис. 3). В чешуйках биотита наблюдаются включения циркона (до 0,05 мм) и апатита и плеохроичные дворики. Биотит в монцогаббро образует чешуйки коричневого цвета. Встречается в виде ксеноморфных зерен между клинопироксенами. Размер чешуек от 0,2 до 0,4 мм. В монцодиоритах биотит встречается в виде единичных чешуек в сростании с плагиоклазом (рис. 3). Размер биотита от 0,2 до 0,3 мм.

Акцессорный апатит в габбро образует субидиоморфные зерна вытянутой формы размером 0,1-0,2 мм (рис. 3). В диоритах апатит встречается в форме мелких (0,01-0,05 мм) гипидиоморфных зерен в виде включений в биотите и плагиоклазе.

Среди рудных минералов в габбро преобладает пирротин. Пирротин представлен округлыми выделениями в роговой обманке и в клинопироксене с размером зерен 0,2-0,3 мм. В диоритах пирротин имеет ксеноморфные выделения вытянутой формы, образует включения в клинопироксене и биотите с размером зерен 0,05-0,1 мм.

Халькопирит встречается только в габбро в сростании с пирротинном, образует ксеноморфные выделения, размером 0,01-0,05 мм.

Магнетит в габбро образует зерна округлой формы, отмечен в виде включений в ортопироксене, размер зерен до 0,05 мм. В диоритах магнетит образует изометричные зерна округлой формы, отмечен в виде включений в биотите, размер зерен 0,02-0,05 мм.

Титанит в габбро образует кристаллы клиновидной формы, встречается в виде вростков в биотите, размер зерен до 0,05 мм. В диоритах титанит образует зерна вытянутой и неправильной формы, встречается в виде мелких включений в биотите, размер зерен 0,02-0,05 мм.

Геохимия

На диаграмме TAS породы Горшеченских плутонов попадают в поля пород нормального и субщелочного ряда (рис. 7а). Габбро, диориты и монцодиориты имеют нормальную щелочность, монцогаббро характеризуются более высокой щелочностью.

На диаграмме зависимости содержания кремнезема (SiO_2) от отношения общего железа (Fe_2O_3) к сумме магния и железа ($MgO + Fe_2O_3$) габбро, диориты и монцодиориты относятся к магнезиальным породам, монцогаббро относятся к железистым породам. Магнезиальность диоритов выше, чем у габбро (рис. 7б). Согласно классификации Irvine и Barragar (1971), габбро относятся к толеитовой серии, тогда как диориты и монцогаббро демонстрируют переход от толеитовой к известково-щелочной серии. Монцодиориты также относятся к известково-щелочной серии (рис. 7в). Габбро, диориты и монцодиориты принадлежат к высококалиевой серии. Монцогаббро имеют гораздо более высокие содержания K_2O и находятся в поле шошонитов, несколько отдельных точек попадают в поле высококалиевой серии (рис. 7г).

На диаграммах Харкера прослеживается явный обратный тренд между SiO_2 и MgO , CaO , причем видны четкие изменения от габбро к диоритам и монцогаббро, затем к монцодиоритам (рис. 8). Между SiO_2 и Fe_2O_3 наблюдается линейный обратный тренд. Положительные тренды отмечены между SiO_2 и Al_2O_3 , K_2O , Na_2O . При этом выделяются две линии трендов: первая от габбро к монцодиоритам, вторая от монцогаббро к диоритам. По отношению SiO_2 и P_2O_5 наблюдается положительный тренд от габбро к диоритам и отрицательный от монцогаббро к монцодиоритам. Для TiO_2 габбро и монцодиориты демонстрируют отрицательную корреляцию, а монцогаббро и диориты дают положительный тренд.

Габбро имеют умеренные содержания литофильных, крупноионных и высокозарядных элементов (рис. 9). Среди высокозарядных элементов только Nb и Ti характеризуются небольшими отрицательными аномалиями (рис. 9).

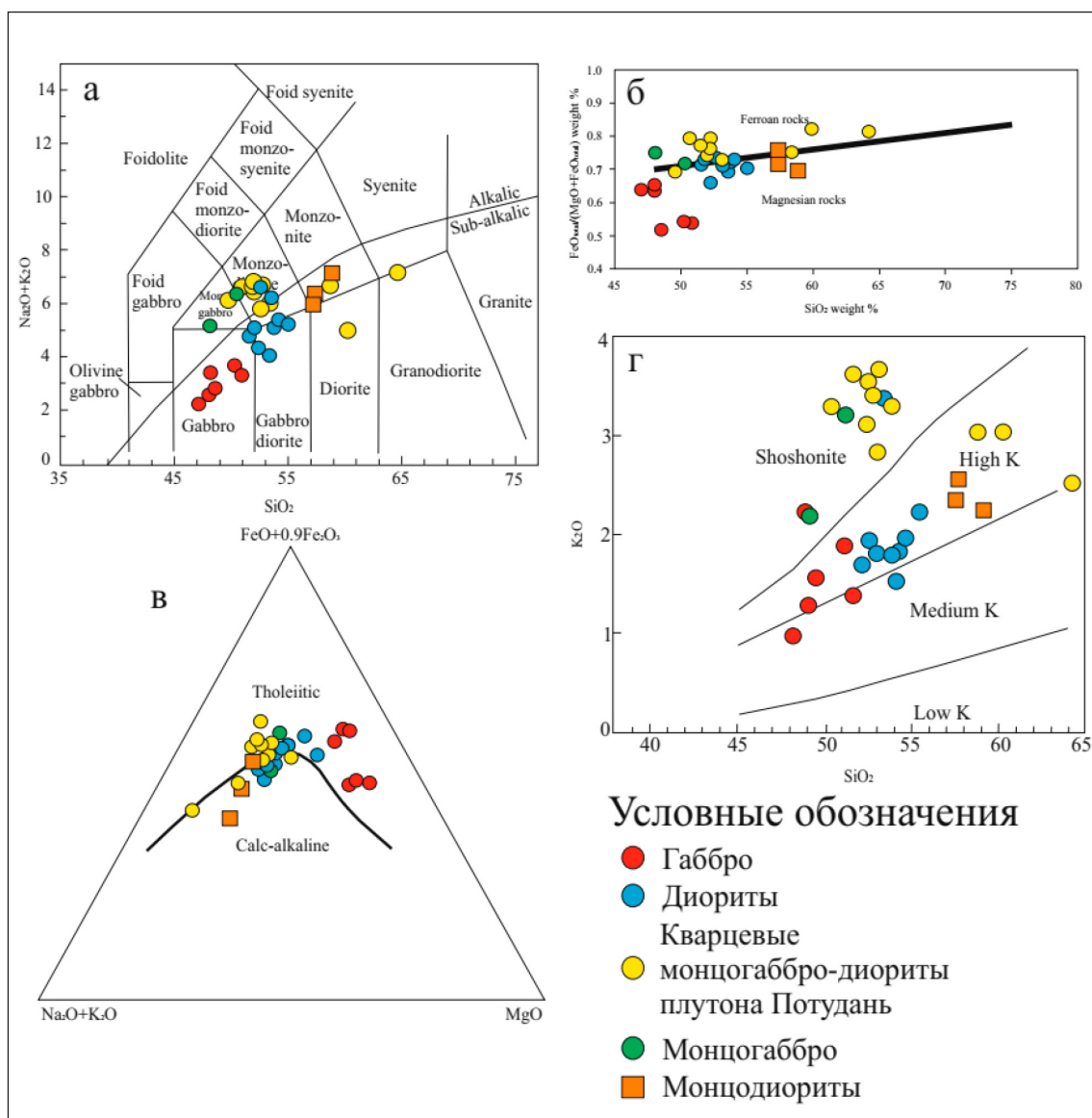


Рис. 7. Классификационные диаграммы: а) $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$; б) $\text{SiO}_2-\text{FeO}_{\text{tot}}/(\text{MgO}+\text{FeO}_{\text{tot}})$; в) дискриминационная диаграмма $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{MgO}-0,9*\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$; г) $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$.
Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в процессе исследования [14; 15]

В некоторых образцах выявлена положительная Ti аномалия. Линии редкоземельных элементов (РЗЭ) показывают сильное фракционирование

легкими $(\text{La}/\text{Sm})_n = 2,27-4,12$

и тяжелыми $(\text{Gd}/\text{Yb})_n = 2,03-3,06$

лантаноидами и слабой отрицательной Eu-аномалией $(\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,73-0,84)$ (рис. 9).

Диориты имеют повышенные содержания литофильных, крупноионных и высокозарядных элементов (рис. 9). Высокозарядные элементы характеризуются небольшими отрицательными Nb и Ti аномалиями (рис. 9). Редкоземельные элементы (РЗЭ)

характеризуются сильно фракционированными легкими $(\text{La}/\text{Sm})_n = 2,38-4,5$ и тяжелыми $(\text{Gd}/\text{Yb})_n = 2,31-3,75$ лантаноидами, а также отрицательной Eu-аномалией $(\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,62-0,95)$.

P-T параметры кристаллизации

Для выяснения условий образования пород Горшеченских плутонов были рассчитаны *P-T* параметры кристаллизации (табл. 2). Для расчетов использовали менее измененные зерна ортопироксена, клинопироксена, плагиоклаза и амфибола. В расчетах учитывались составы центров зерен.

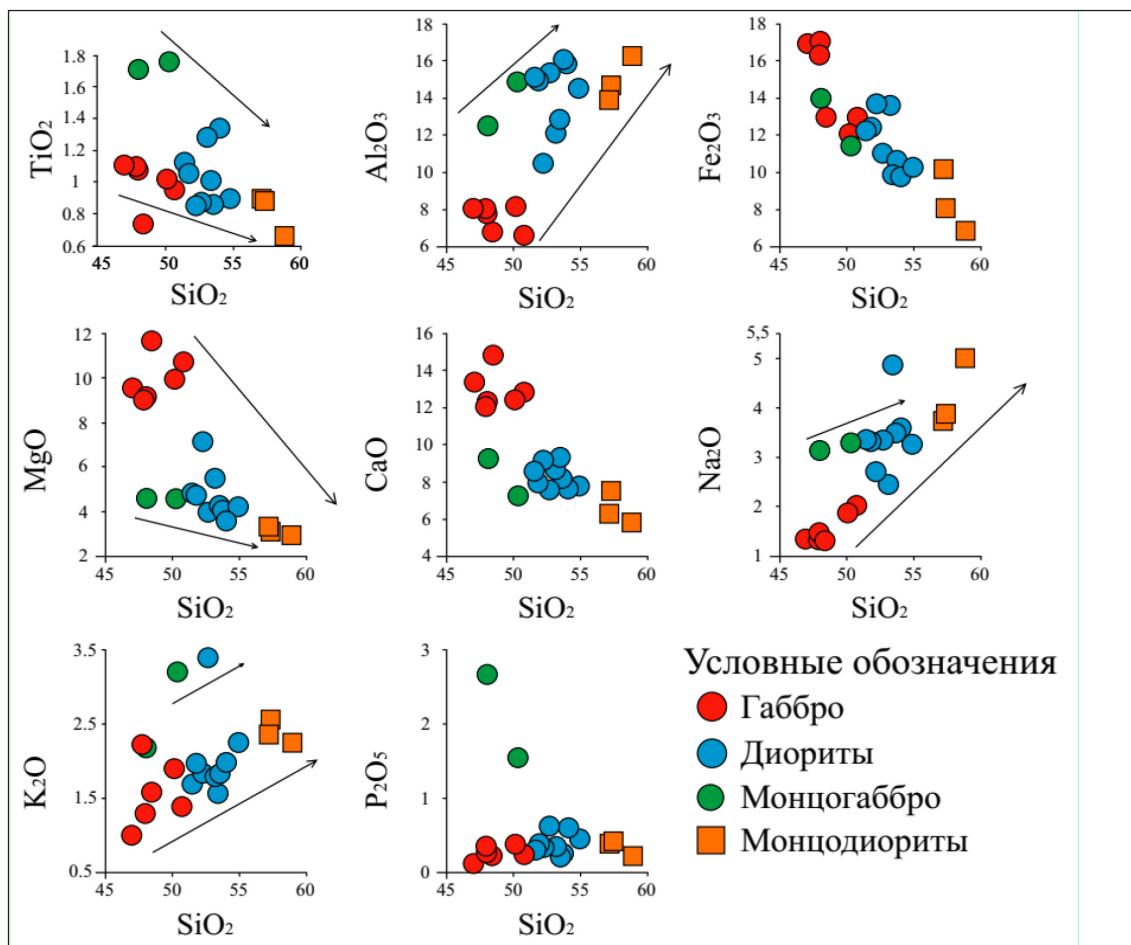


Рис. 8. Бинарные диаграммы для петрогенных оксидов (% мас.) в зависимости от содержания SiO_2 (% мас.)

Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в процессе исследования [16]

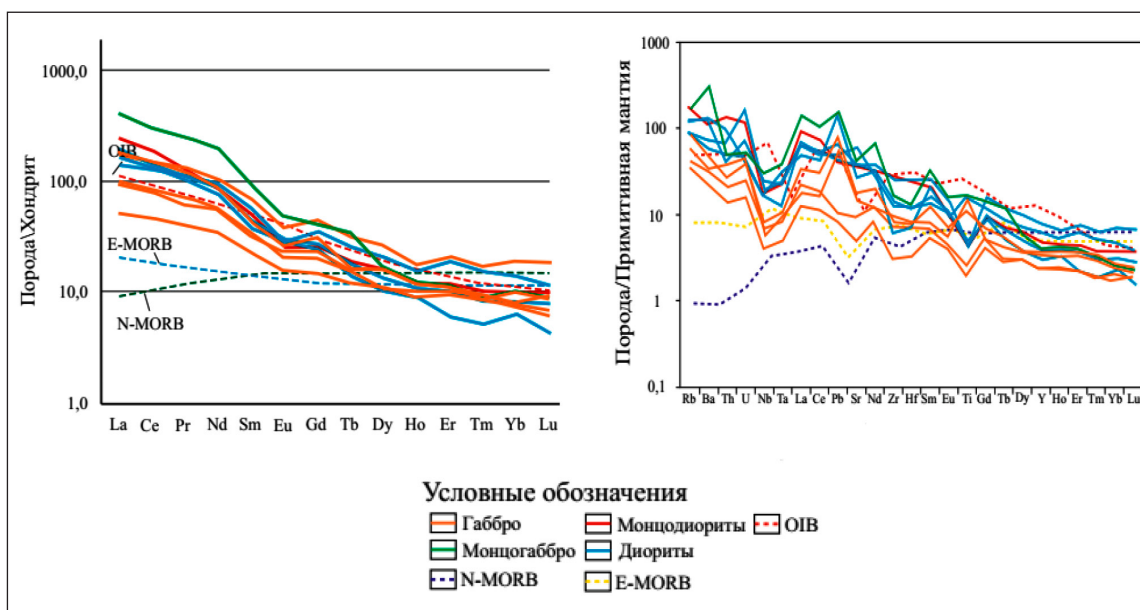


Рис. 9. Нормализованное к хондриту распределение редкоземельных (а) и нормализованное к примитивной мантии распределение малых и редких (б) элементов в породах Горшеченских плутонов

Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в процессе исследования [14]

Таблица 2

Параметры кристаллизации пород Горшеченских плутонов

Геобарометр, геотермометр	Габбро		Диориты	
Ортопироксен-расплав (Putirka K., 2008)	1290-1298±48 °C	0,8-1,2±0,26 ГПа	–	–
Клинопироксен (Putirka K., 2008)	1143-1169±59 °C	0,46-0,64±0,5 ГПа	1168-1170±59 °C	0,6-0,64±0,5 ГПа
Плаггиоклаз (Putirka K., 2008)	1015-1085±23 °C	0,49-0,78±0,38 ГПа	1134-1155±23 °C	0,5-0,82±0,38 ГПа
Амфибол (Putirka K., 2016; American Mineralogist)	742-785±23 °C	0,51-0,67±0,3 ГПа	719-792±23 °C	0,15-0,28±0,3 ГПа

Примечание: составлено автором на основе полученных расчетов в ходе исследования.

В исследованиях использовали: для габбро – 4 зерна ортопироксена, 8 зерен клинопироксена, 13 зерен плаггиоклаза, 11 зерен амфибола; для диоритов – 3 зерна клинопироксена, 6 зерен плаггиоклаза, 22 зерна амфиболов. Использовались уравнения для расчета температур и давлений по ортопироксенам, клинопироксенам, плаггиоклазам и амфиболам. Геобарометры по Anderson and Smith, 1995, Mutch et al., 2016, Hammarstrom and Zen, 1986, не использовались, потому что они применяются для гранитных систем. Геобарометр по Ridolfi et al., 2010, не применяли, потому что он дает завышенные значения. Геобарометры по Emslie et al., 1994, Charlier et al., 2010, авторам не подходят, потому что они разработаны для анортосит-мангерит-чарнокит-гранитных комплексов. Геотермометры по Wan et al., 2008, Loucks, 1996, не использовались, исследуемые породы образовывались при более высоких давлениях, и они не относятся к щелочным породам. Геотермометр по Henry and Medaris, 1980, не использовали, потому что он откалиброван для ультраосновных пород. В результате авторы остановились на методиках по Putirka (2008) и Putirka (2016; American Mineralogist) (табл. 2).

Петрологическое моделирование кристаллизации

С целью выяснения согласованности модельных параметров кристаллизации с рассчитанными параметрами по полученным минеральным составам пород Горшеченских плутонов проводилось петрологическое моделирование кристаллизации на основе программного пакета Comagmat 3.75, который позволяет задаться необходимыми

для наших пород условиями: открытая система (кислородные буферы), так как геохимические тренды пород демонстрируют обеднение высокочargedными элементами, характерное для эволюции с одновременной потерей межзернового расплава; основной кислородный буфер – QFM (постоянный), потому что является стандартным для известково-щелочной серии, к которой принадлежат изучаемые объекты, и занимает промежуточное положение между восстановительными и высокоокислительными условиями; содержание воды в модельной системе 0,4 % мас. отвечает минимальному порогу стабильности роговой обманки при заданном давлении; приращение кристаллизации от 1 до 75%. Для расчетов были взяты составы минералов из габбро и диоритов. Монцогаббро и монцодиориты не использовались, потому что петролого-минералогические исследования показали, что эти породы более сильно измененные. Для габбро (образец К-47/258,2) моделирование приводилось при следующих условиях: 1) вариант – декомпрессия от 1,5 до 0,1 ГПа; 2) вариант – декомпрессия от 1 до 0,05 ГПа. Для диоритов были выбраны два образца – К-47/234,6 и К-47/260,3, для которых моделирование приводилось при следующих условиях: декомпрессия от 1 до 0,05 ГПа.

Габбро – образец К-47/258,2: 1) вариант – плаггиоклазы формировались при $T = 1067-1041^{\circ}\text{C}$, $P = 1,19-0,96$ ГПа, а клинопироксены – при $T = 1314-1041^{\circ}\text{C}$, $P = 1,46-0,96$ ГПа; 2) вариант – плаггиоклазы формировались при $T = 1063-1043^{\circ}\text{C}$, $P = 0,32-0,25$ ГПа, а клинопироксены – при $T = 1270-1043^{\circ}\text{C}$, $P = 0,99-0,25$ ГПа. Диориты – образец К-47/234,6: плаггиоклазы форми-

ровались при $T = 1090-1057\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0,05\text{ ГПа}$, а клинопироксены – при $T = 1221-1057\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0,95-0,05\text{ ГПа}$; образец К-47/260,3: плагиоклазы формировались при $T = 1078-1037\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0,51-0,29\text{ ГПа}$, а клинопироксены – при $T = 1243-1037\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0,99-0,29\text{ ГПа}$.

Полученные модельные температуры и давления для пород Горшеченских плутонов соотносятся и совпадают в пределах ошибки с температурами и давлениями, рассчитанными по полученным химическим составам минералов.

Заключение

По результатам петрографических и минералогических исследований выделены следующие породы Горшеченских плутонов: габбро, монцогаббро, монцодиориты и диориты. Отличительными чертами монцогаббро являются повышенное содержание TiO_2 , которое объясняется высоким содержанием ильменита в породе, а также повышенное содержание P_2O_5 , которое обусловлено концентрацией апатита. Монцодиориты характеризуются отсутствием клинопироксена, повышенным содержанием плагиоклаза.

Исследования показали, что для плагиоклазов наблюдается четкий тренд от более кальциевых к более натриевым составам: габбро – (наиболее кальциевые составы, ядра: лабрадор, An_{50-57}) – диориты – (состав также широкий, но сдвинут в сторону натрия, есть кальциевые ядра: лабрадор, An_{52-57} , но края и незональные зерна – андезин An_{31-45}) – монцогаббро (представлен только незональными зернами андезина и олигоклаза An_{15-37} , это самый натриевый плагиоклаз из всех). Магнезиальность клинопироксенов уменьшается от габбро через монцогаббро к диоритам ($X_{\text{Mg}} = 0,59-0,93$). Амфиболы в габбро являются наиболее магнезиальными и имеют самый широкий диапазон составов, вплоть до 0,85 моль. Амфиболы в диоритах – наименее магнезиальные. Амфиболы в монцогаббро занимают промежуточное, но ближе к диоритам, положение. Хотя диапазоны сильно перекрываются, максимальные содержания TiO_2 выше в габбро и диоритах. При этом в диоритах и монцогаббро есть и очень низкие содержания титана (~0,47 % мас.). Для амфиболов во всех породах содержание Al_2O_3 характеризуется как «умеренное» и попадает в перекрывающийся диапазон (~5,7-11,1 % мас.). Биотиты во всех исследованных породах относятся к одному и тому же классу – умеренно магнезиальные ($X_{\text{Mg}} = 0,47-0,6$), местами замещаются хлоритом.

По результатам рассчитанных параметров кристаллизации и моделирования получили возможность показать условия кристаллизации пород Горшеченских плутонов в пределах погрешности: габбро кристаллизуются при $T = 1248-742\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1,2-0,46\text{ ГПа}$; диориты кристаллизуются при $T = 1170-719\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0,82-0,15\text{ ГПа}$. Полученные результаты позволяют в дальнейшем охарактеризовать условия проявления базитового магматизма периода 2,05-2,07 млрд лет в зоне сочленения Курского блока Сарматии и Волго-Уралии.

Список литературы

1. Bogdanova S., Gorbatshev R., Grad M., Guterch A., Janik T., Kozlovskaya E., Motuza G., Skridlaite G., Starostenko V., Taran L. The EUROBRIDGE: New insight into the geodynamic evolution of the East European Craton // Geological Society, London, Memoirs. 2006. № 32 (1). P. 599-628. URL: <https://lup.lub.lu.se/search/publication/590560> (дата обращения: 12.05.2026).
2. Кориш Е. Х., Савко К. А., Сальникова Е. Б., Самсонов А. В., Иванова А. А., Ларионов А. Н., Цыбуляев С. В. Палеопротерозойский диоритгранодиоритовый магматизм Курского блока Сарматии: расшифровка сближенных во времени геологических событий // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 60–63. DOI: 10.17076/geo1655.
3. Хераскова Т. Н., Волож Ю. А., Антипов М. П., Быкадоров В. А., Патина И. С., Сапожников Р. Б. Стрoение зоны сочленения микроконтинентов Сарматия, Волгоуралия и Фенноскандия в составе фундамента Восточно-Европейской платформы // Литосфера. 2023. № 23 (3). С. 309-324. DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-3-309-324.
4. Петракова М. Е., Терентьев Р. А. Петрографические и минералогические признаки взаимодействия гранитоидных и габброидных магм плутона Потудань, Воронежский кристаллический массив // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2018. № 1. С. 32-45. URL: http://www.vestnik.vsu.ru/index_ru.asp (дата обращения: 12.05.2026).
5. Bibikova E. V., Bogdanova S. V., Postnikov A. V., Popova L. P., Kirnozova T. I., Fugzan M. M., and Glushchenko V. V. Sarmatia-Volgo-Uralia junction zone: isotopic-geochronologic characteristic of supracrustal rocks and granitoids // Stratigraphy. Geol. Correlation. 2009. № 17 (6). С. 561–573. URL: <https://link.springer.com/journal/11506/volumes-and-issues/17-6> (дата обращения: 12.05.2026).
6. Петракова М. Е., Савко К. А., Балтыбаев Ш. К. Магматизм Донского террейна Волго-Донского орогена // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 107–110. DOI: 10.17076/geo1654.
7. Terentiev R. A., Savko K. A., Korish E. H., Chervyakovskaya M. V. Geochemistry and Age of the Paleoproterozoic Metavolcanic and Metasedimentary Rocks of the Don Terrane of the Volga-Don Orogen // Geochemistry International. 2024. № 62 (7). С. 675–695. DOI: 10.1134/S0016702924700368.
8. Terentiev R. A., Savko K. A., Petrakova M. E., Santosh M., Korish E. H. Paleoproterozoic granitoids of the Don terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications // Precambrian Research. 2020. № 346. P. 105790. DOI: 10.1016/j.precamres.2020.105790.
9. Петракова М. Е., Терентьев Р. А., Юрченко А. В., Савко К. А. Геохимия и геохронология палеопротерозойских кварцевых монцогаббро-монцодиорит-гранодиоритов плутона Потудань (Волго-Донской ороген) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2022. Т. 67. № 1. С. 74-96. DOI: 10.21638/spbu07.2022.105.
10. Putirka K. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. In: Putirka K., Tepley F. (Eds.). Minerals, Inclusions

and Volcanic Processes, Reviews in Mineralogy and Geochemistry // Mineralogical Soc. Am. 2008. № 69. P. 61-120. URL: <https://www.mindat.org/reference.php?id=6702940> (дата обращения: 08.05.2026). DOI: 10.2138/rmg.2008.69.3.

11. Putirka K. Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes // American Mineralogist. 2016. № 101 (4). P. 841-858. DOI: 10.2138/am-2016-5506.

12. Терентьев Р. А., Савко К. А., Стрик Ю. Н. Палеопротерозойские андезиты восточной части Воронежского кристаллического массива (Восточносарматский ороген): геохимия и петрогенезис // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2016. № 1. С. 66-75. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2016/01/2016-01-09.pdf> (дата обращения: 08.05.2026).

13. Leake B. E., Woolley A. R., Arps C. E. S. et al. Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the Inter-

national Mineralogical Association's amphibole nomenclature // American Mineralogist. 2004. № 89. P. 883-887. DOI: 10.2138/am-2004-5-622.

14. 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 ВГУ. Серия: Геология. 2022. № 3. С. 4-19. DOI: 10.17308/geology/1609-0691/2022/3/4-19.

15. Irvine T. N., Baragar W. R. A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks // Canadian Journal of Earth Sciences. 1971. № 8. 523-548. DOI: 10.1139/e71-055.

16. 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. DOI: 10.17223/25421379/29/1.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.