

Палеопротерозойские гранодиориты I-типа Луневского массива в Курском блоке Сарматии: U-Pb возраст, изотопная систематика и источники расплавов

© 2021 К. А. Савко^{1✉}, Е. Х. Кориш¹, Н. С. Базилов¹, С. В. Цыбуляев¹, В. С. Червяковский², Н. В. Холина¹, И. Хуссейн¹

¹*Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация*

²*Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого, Уральского отделения Российской академии наук, ул. Вонсовского, 15, 620016, Екатеринбург, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: Полученные в последнее время датировки возраста и изотопно-геохимические данные для пород Курского блока позволяют полностью пересмотреть историю роста коры Восточной Сарматии в раннем докембрии. Однако имеется очень немного данных о возрасте, изотопной и элементной геохимии гранодиорит-диоритовых массивов, представляющих собой наиболее объемное проявление палеопротерозойского магматического события в Курском блоке. Настоящая статья вносит вклад в решение этой проблемы и посвящена Луневскому массиву гранодиоритов.

Методика: Для определения возраста образования и источников расплавов гранодиоритов было проведено геохимическое и U-Pb, Lu-Hf и Sm-Nd изучение пород Луневского массива.

Результаты и обсуждение: Гранодиориты Луневского массива принадлежат к гранитоидам I-типа и имеют адакитовые геохимические характеристики. Возраст кристаллизации массива составляет 2040 млн лет. Он имеет посттектоническую позицию.

Заключение: Изотопный состав Hf в цирконе указывает на участие в образовании гранодиоритового расплава нескольких источников, включающих коровые палеоархейские и ювенильные мантийные палеопротерозойские протолиты.

Ключевые слова: Курский блок, палеопротерозой, гранодиориты, U-Pb изотопный возраст, источники расплавов, изотопная систематика

Источник финансирования: LA-ICP-MS исследование проведено в ЦКП "Геоаналитик" ИГГ УрО РАН в рамках темы № АААА-А18-118053090045-8 государственного задания ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП "Геоаналитик" ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-680

Для цитирования: Савко К. А., Кориш Е. Х., Базилов 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: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.4/3787>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

Введение

За последние несколько лет нами были получены прецизионные датировки возраста и изотопно-геохимические данные для раннедокембрийских пород Курского блока, что позволило выявить крупное магматическое событие на рубеже 2.06 млрд лет [1, 2] и полностью пересмотреть историю роста коры Восточной Сарматии в раннем докембрии. В период 2.05–2.07 млрд лет произошло внедрение в кору большого объема магм различного состава, представленных в Курском блоке диорит-гранодиоритовым стойло-николаевским [1, 3], габбро-сиенитовым шебекинским [4] и габброидным золотухинским [5] комплексами, вулканами бимодальной серии курбакинской и андезитами глазуновской свит [6, 7].

Палеопротерозойские гранодиорит-диоритовые массивы в архейском Курском блоке Сарматии сконцентрированы в палеопротерозойской Тим-Ястребовской внутриконтинентальной рифтовой структуре (рис. 1, 2), хотя встречаются и за ее пределами [3]. Они

представляют наиболее объемное проявление мощного палеопротерозойского магматического события в Курском блоке Сарматии. Несмотря на большое количество массивов и многочисленных даек диоритов и гранодиоритов стойло-николаевского комплекса, вскрытых помимо скважин еще и в железорудных карьерах Курской магнитной аномалии, данных об их возрасте, изотопной и элементной геохимии очень немного [1, 3]. В связи с этим, суждения об источниках расплавов и петрогенезисе объемного палеопротерозойского диорит-гранодиоритового магматизма сталкиваются с многочисленными неопределенностями.

Настоящая статья призвана внести вклад в решение проблем петрогенезиса палеопротерозойского кислого магматизма Курского блока. Ее цель – определение возраста образования и источников расплавов Луневского массива гранодиоритов в Тим-Ястребовской рифтогенной структуре на основе их геохимического изучения, U-Pb, Lu-Hf, и Sm-Nd изотопной систематики.

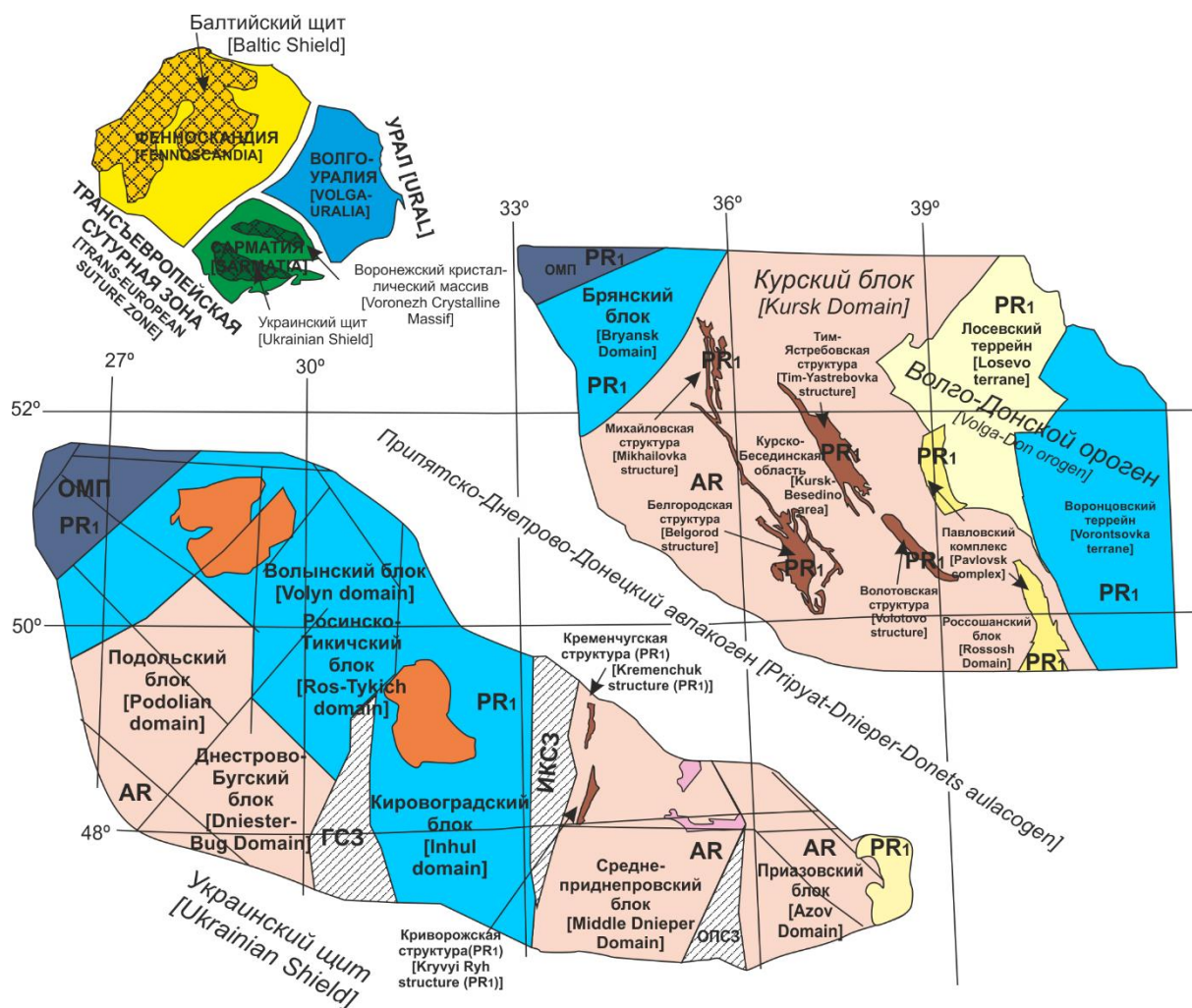


Рис. 1. Схематическая структурная карта Сарматии, составленная по [8] для Украинского щита и по собственным материалам для Воронежского кристаллического массива. Аббревиатуры: ГСЗ – Голованевская сутурная зона, ИКСЗ – Ингулец-Криворожская сутурная зона, ОПСЗ – Орехово-Павлоградская сутурная зона, ОМП – Осницко-Микашевичский пояс.

[Fig. 1. A sketch map of the Sarmatia, compiled after [8] for Ukrainian Shield, and authors data (for Voronezh Crystalline Massif). Abbreviations: ГСЗ – Golovanevsk Suture Zone, ИКСЗ – Ingulets-Krivoy Rog Suture Zone, ОПСЗ – Orekhovo-Pavlograd Suture Zone, ОМП – Osnitsk-Mikashевичi Igneous Belt.]

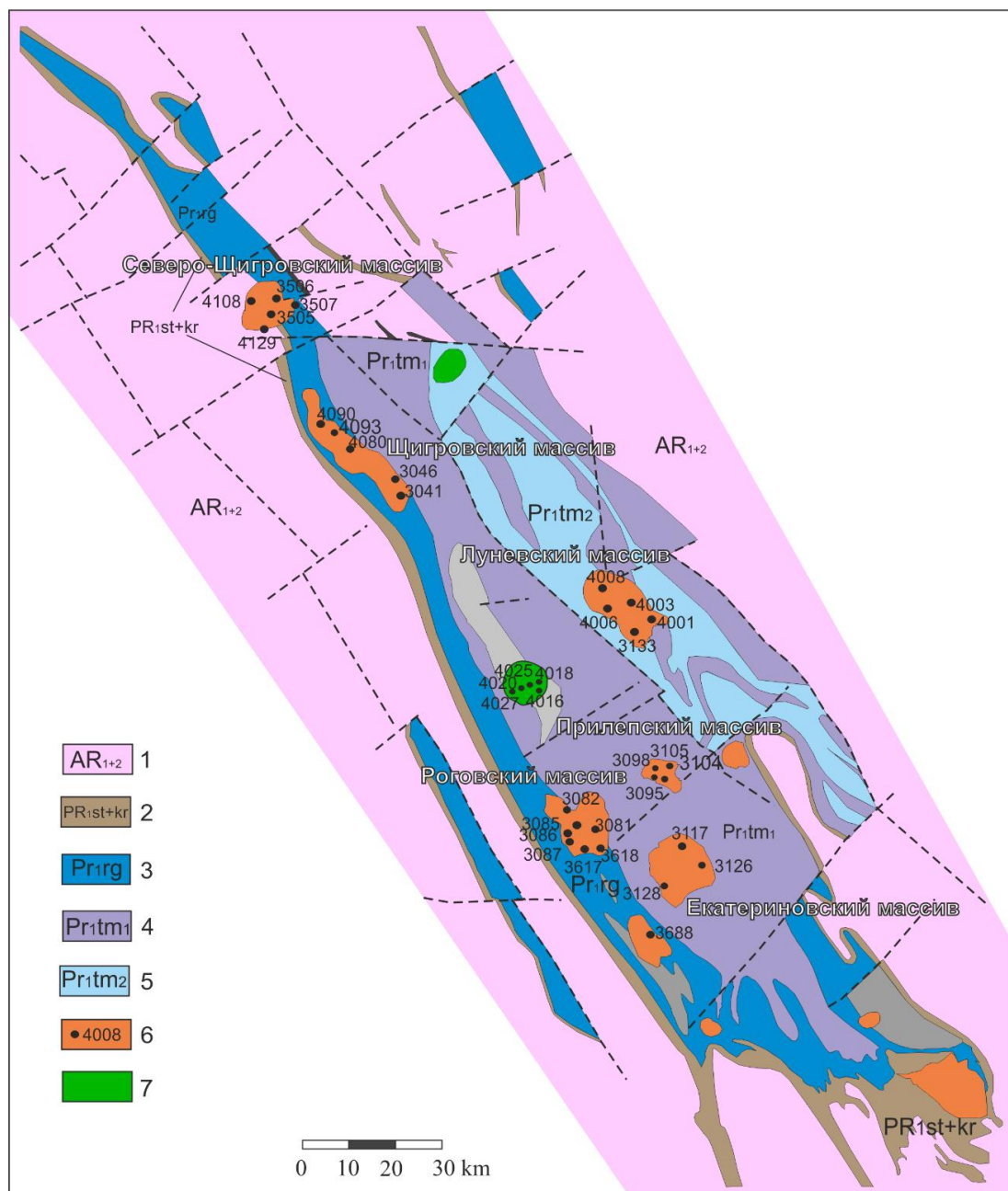


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Тим-Ястребовской структуры: 1 – ТТГ-ассоциация и метабазиты (AR₁₊₂); 2 – стойленская и коробовская свиты курской серии (PR_{1st+kr}); 3 – роговская свита оскольской серии (PR_{1rg}); 4 – нижняя подсвита тимской свиты оскольской серии (PR_{1tm1}); 5 – верхняя подсвита тимской свиты оскольской серии (PR_{1tm2}); 6 – гранитоиды стойло-никалаевского комплекса, местоположение и номера пробуренных скважин; 7 – габброиды.

[**Fig. 2.** Schematic geological map of the Tim-Yastrebovka structure: (1) – TTG association and metabasites (AR₁₊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_{1tm1}); (5) – upper subformation of the Tim Formation of the Oskol Group (PR_{1tm2}); (6) – Stoilo-Nikolaev Complex and drill-holes; (7) – gabbroids. Inscriptions on the picture: Северо-Щигровский массив – North Shigry Massif, Щигровский массив – Shigry Massif, Луневский массив – Lunevsky Massif, Прилепский массив – Prilepy Massif, Роговский массив – Rogovoe Massif, Екатериновский массив – Ekaterinovsky Massif.]

Геологическая позиция

Луневский массив и другие крупные диорит-гранодиоритовые массивы (Роговский, Екатериновский, Щигровский и др.) в Курском блоке Сарматии находится в пределах палеопротерозойской Тим-Ястребовской внутриконтинентальной рифтовой структуры (рис. 2).

Интрузивный магматизм в Тим-Ястребовской структуре и ее обрамлении представлен, преимущественно, диорит-гранодиоритовыми массивами, небольшими интрузиями и силлами амфиболовых габбро, прорывающими палеопротерозойские метаморфизованные вулканогенно-осадочные толщи (рис. 2). Интрузии гранитоидов образуют изометричные и

вытянутые в северо-западном или субмеридиональном направлении массивы и штокообразные тела площадью от 2.5 до 57 км² и многочисленные дайки. Значительно реже встречаются интрузии габбро, самая крупная из них Гнилушинская имеет площадь около 9 км². Все интрузии отчетливо дискордантные, секут складчатые структуры вмещающих палеопротерозойских осадочно-метаморфических толщ курской (терригенные породы и железистые кварциты) и оскольской (терригенные, карбонатные породы и metabазальты) серий. Контакты четкие, резкие, секущие. Вмещающие породы на контакте орговикованы, скарнированы и рассечены многочисленными апофизами интрузий. Вблизи интрузий во вмещающих породах развита контактово-метаморфическая зональность, но признаки плавления отсутствуют. Отдельные массивы имеют зональное строение. Их периферические зоны сложены диоритами, которые через кварцевые диориты постепенно переходят в гранодиориты в центральных частях интрузий.

В эзоконтактных зонах массивов гранитоидов присутствуют многочисленные дайки, жилы и апофизы диоритов, гранодиоритов таких же по составу, как и в самих интрузиях. В дайках и жилах гранитоиды более мелкозернистые, чем в массивах, имеют выраженную порфировидную структуру. В эндоконтактных зонах массивов часто присутствуют ксенолиты вмещающих пород размером от 0.1 до 3.0 м.

Магнитные аномалии в пределах массивов не поддаются однозначной интерпретации, являясь продолжением высокоинтенсивных магнитных аномалий от железорудной толщи курской серии. Они, возможно, вызваны крутопадающими толщами железистых кварцитов, не выходящих на эрозионный раннедокембрийский срез. Гранодиоритовые массивы довольно контрастно проявляются в гравитационном поле. Выделение их проводится по локальным минимумам вертикальных производных силы тяжести.

Луневский массив гранодиоритов расположен в восточной части Тим-Ястребовской структуры. В плане массив имеет округлую изометричную форму (рис. 2). Его площадь составляет 24 км². Массив изучен скважинами: 4001, 4003, 4006, 4008 и 3133 на глубину от 8.0 м (скв. 4003) до 190.0 м (скв. 4006). Керн скважин 3133 и 4003 был утрачен. Диориты скважинами вскрыты не были. Вмещающими породами являются кислые и основные вулканиты тимской свиты. В контактовых зонах риолиты и дациты грейзенизированы с новообразованиями кварца и мусковита, часто содержат турмалин и флюорит. Основные вулканиты превращены в пироксеновые роговики.

Методы исследований

Определение содержаний главных элементов в породах выполнено на рентгено-флуоресцентном спектрометре S8 Tiger (Bruker AXS GmbH, Германия) 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. %. Обработка результатов проводилась посредством разработанных методик в программе Spectra Plus (Bruker AXS GmbH, Германия).

Локальные анализы минералов выполнены на электронном микроскопе Jeol 6380LV с системой количественного энергодисперсионного анализа «Inca» (ЦКПНО ВГУ). Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1.2 мА, время набора спектра 90 сек, диаметр пучка 1–3 мкм. ZAF коррекция при расчете содержания окислов и оценка точности проводилась с помощью комплекта программ математического обеспечения системы. Точность анализа систематически контролировалась по эталонным образцам природных и синтетических минералов.

Малые и редкие элементы определялись методом индукционно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием анализа (ICP-MS) во Всероссийском научно-исследовательском геологическом институте им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Разложение образцов пород осуществлялось сплавлением с метаборатом лития. Перевод образующейся смеси твердых комплексных оксидов в раствор осуществляли с помощью азотной кислоты. Правильность анализа контролировали путем измерения международных и российских стандартных образцов GSP-2, VM, СГД-1А, СТ-1. Ошибки определения концентраций составляли от 3 до 5 мас. % для большинства элементов.

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 [9] с использованием эталонных цирконов “91500” и “Темога”. При расчетах использованы константы распада урана [10]. Поправки на нерадиогенный свинец введены по модели [11] на основе измеренных отношений ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb. Полученные результаты обработаны с помощью программы SQUID [12].

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 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219. Нормализованные отношения приводились к значению ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512115 в международном изотопном стандарте JNdI-1. Погрешность определения содержаний Sm и Nd составляла 0.5 %, изотопных отношений ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd – ± 0.5 %, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd – ± 0.002 % (2σ). Уровень холостого опыта не превышал 10 пг для Sm и 20 пг для Nd. При расчете величин εNd(T) использовались современные

значения однородного хондритового резервуара (CHUR) с параметрами $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$.

Изучение Lu-Hf-изотопного состава цирконов выполнено на многоколлекторном масс-спектрометре Neptune Plus с приставкой для лазерной абляции NWR 213 в Институте геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург. Выполнена оптимизация процедуры обработки экспериментальных данных со стандартами циркона Mud Tank, GJ-1 [13]. Неопределенность единичного измерения отношения $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ в виде 2SD – в интервале 0.005–0.008 %, единичного определения значения $\varepsilon(\text{Hf})$ в виде 2SD варьировала для перечисленных стандартов в интервале 5–9 %. Параметры процесса лазерной абляции: плотность энергии лазерного излучения – 14 Дж/см², частота повторения импульсов – 20 Гц, ди-

аметр кратера – 25 мкм. Для обработки Lu-Hf данных был использован макрос Hf-INATOR для Excel [14].

Петрография

Гранодиориты, изученные в скважинах 4001, 4006 и 4008, розовато-серого и светло-серого цвета среднезернистые, иногда порфириовидные. Текстура гранодиоритов массивная участками такситовая, структура гипидиоморфнозернистая, порфириовидная, обусловленная наличием крупных зерен микроклина размером 1.0–1.5 см (рис. 3). По минеральному составу породы довольно однообразны – сложены плагиоклазом, микроклином, биотитом, кварцем. В отличие от гранодиоритов других массивов [1] роговая обманка нами не встречена. Акцессорные минералы представлены титанитом, ильменитом, сульфидами, цирконом, вторичные – эпидот, серицит, карбонат, хлорит.

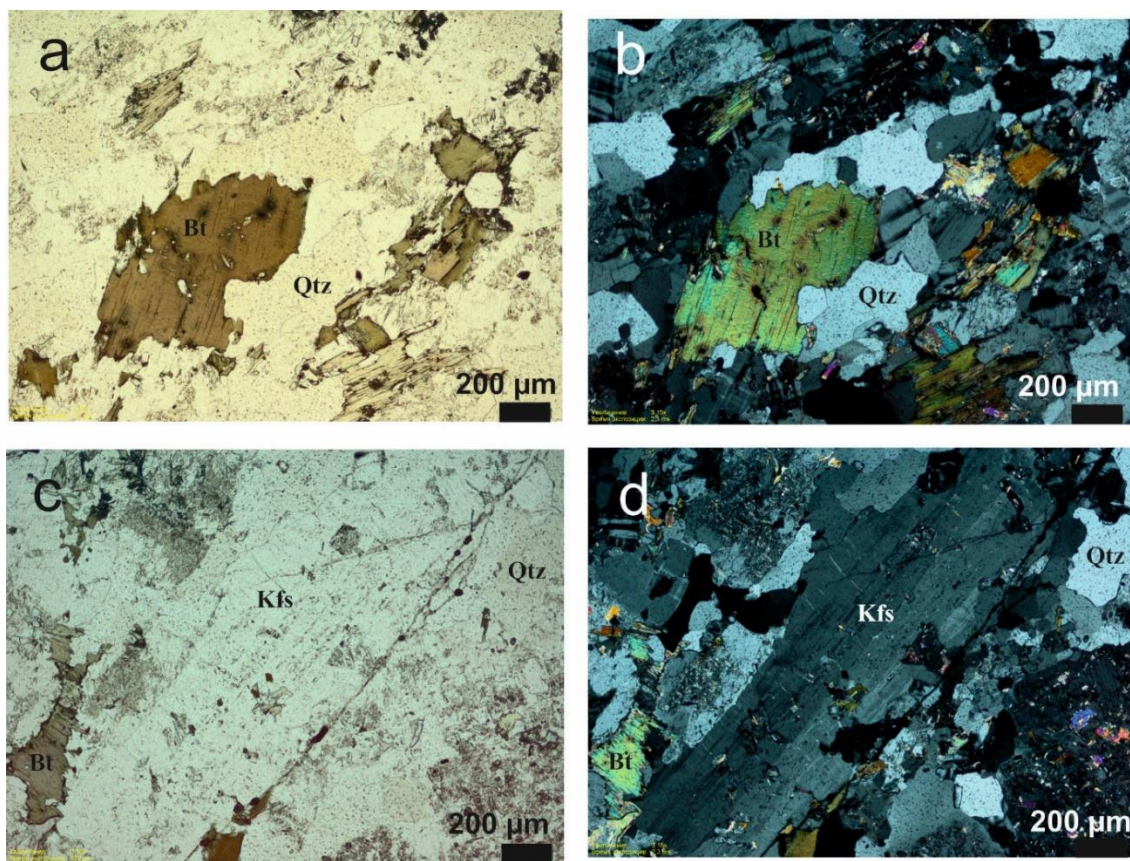


Рис. 3. Фото шлифов гранодиоритов Луневского массива: *a, b* – образец 4006/252.5; *c, d* – образец 4008/217.8 в проходящем и поляризованном свете. Аббревиатура минералов по [15].

[Fig. 3. Photomicrographs of the granodiorites thin sections of the Lunevsky Massif: (*a, b*) – sample 4006/252.5; (*c, d*) – sample 4008/217.8 in transmitted and polarized light. Mineral abbreviations after [15].]

В гранодиоритах *плагиоклаз* присутствует в количестве от 40 до 60 мас. % и представлен удлиненными и таблитчатыми идиоморфными зернами размером 0.5–2.0 мм. По составу он отвечает олигоклазу и имеет зональность от Ab_{76-78} в центральных частях до Ab_{84-87} в краевых. *Биотит* встречается в виде лейст размером 0.2–1.0 мм в количестве до 10 мас. % (рис. 3 *a, b*). Лейсты *биотита* плеохроируют от густо-буро-зеленого до

светло-коричневого цвета и бывают наполнены мелкими включениями титанита, эпидота, алланита, циркона с плеохроичными двориками. По составу биотит среднежелезистый ($X_{\text{Fe}} = 0.58-0.61$), довольно глинозёмистый ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 16.0-17.2$ мас. %) с умеренными содержаниями титана ($\text{TiO}_2 = 1.0-2.4$ мас. %). *Микроклин* в количестве 15–25 мас. % встречается как в виде решетчатых мелких зерен в основной массе, так и в виде

крупных порфировых выделений (от 2–4 мм до 1.5 см). В крупных зернах микроклина отмечаются включения биотита, плагиоклаза, кварца (рис 3 с, d). На контакте с зернами плагиоклаза часто отмечается мирмекитовая структура. По составу это почти чистый калиевый полевой шпат с незначительной примесью альбитового (< 11 %) компонента. Кварц присутствует в количестве до 15–20 мас. % и образует изометричные и ксеноморфные зерна размером 0.1–0.8 мм с неровными границами и содержит микроскопические включения игольчатых кристаллов рутила. Обогащенные рутилом зерна имеют в образце голубоватый цвет.

Из аксессуарных минералов наиболее характерным является титанит, образующий довольно крупные (0.02–0.2 мм) красновато-коричневые кристаллы с ромбическими и клиновидными сечениями. Рудные минералы представлены ильменитом, пиритом, пирротинном, реже халькопиритом. Среди вторичных минералов резко преобладают минералы группы эпидота-клиноцоизита.

Геохимия

В скважинах, вскрывших Луневский массив, нам не удалось обнаружить диоритов, хотя, возможно, они присутствуют в его строении. Поэтому геохимическая характеристика массива приводится только для 17 образцов гранодиоритов из трех скважин (4001, 4006, 4008). Они имеют довольно узкий интервал содержаний SiO_2 от 65.6 до 68.4 мас. % (среднее 67.0 мас. %) и довольно высокие значения суммы щелочей ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.8\text{--}9.3$, ср. 8.5 мас. %) в основном с близкими концентрациями калия и натрия ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.76\text{--}1.42$, ср. 1.05) (табл. 1). Гранодиориты Луневского массива характеризуются умеренными содержаниями кальция ($\text{CaO} = 2.3\text{--}3.3$ мас. %), фосфора ($\text{P}_2\text{O}_5 = 0.11\text{--}0.23$ мас. %) и титана ($\text{TiO}_2 = 0.26\text{--}0.49$ мас. %), являются в основном метаглиноземистыми ($A/\text{CNK} < 1$) (рис. 4) и довольно железистыми ($X_{\text{Fe}} = 0.45\text{--}0.79$, ср. 0.68).

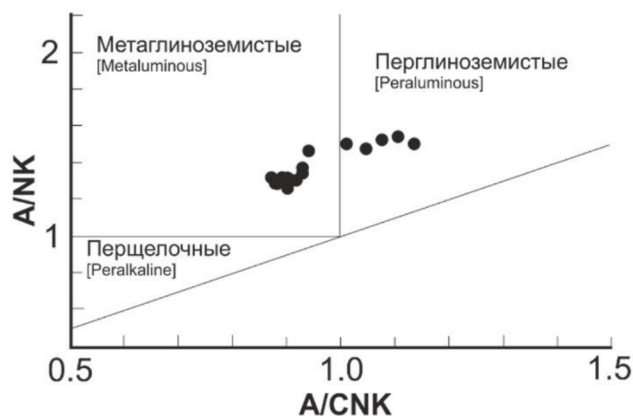


Рис. 4. Составы гранодиоритов Луневского массива на диаграмме A/NK (молярные отношения $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$) - A/CNK (молярные отношения $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$). [Fig. 4. A/NK (molar $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$) versus A/CNK (molar $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$) diagram for granodiorites of the Lunevsky Massif.]

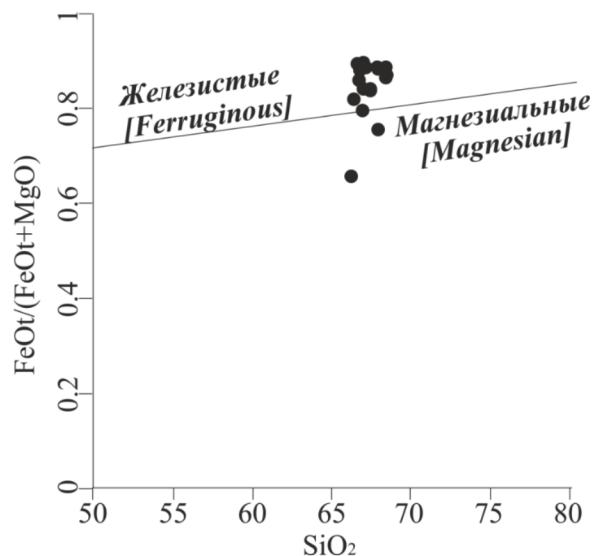


Рис. 5. Составы гранодиоритов Луневского массива на классификационной диаграмме $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO}) - \text{SiO}_2$.

[Fig. 5. $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO}) - \text{SiO}_2$ diagram for granodiorites of the Lunevsky Massif].

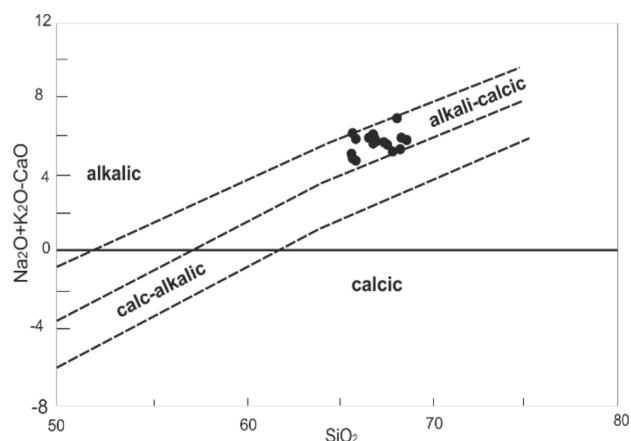


Рис. 6. Составы гранодиоритов Луневского массива на классификационной диаграмме $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$.

[Fig. 6. $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ diagram for granodiorites of the Lunevsky Massif.]

На классификационных диаграммах [16] гранодиориты Луневского массива попадают в поля железистых и магниальных метаглиноземистых пород известково-щелочной серии (рис. 5, 6). Из-за повышенной щелочности точки составов гранодиоритов попадают на классификационных диаграммах [17, 18] преимущественно в поля кварцевых монцонитов и монцограцитов (рис. 7). На бинарных диаграммах прослеживается неявная отрицательная корреляция кремнезема с алюминием, фосфором и титаном (рис. 8).

Для гранодиоритов характерны низкие содержания «мафических» элементов: Cr (4–48 ppm, ср. 29 ppm) и Ni (7–11 ppm), повышенные – литофильных: Ba (1010–1553 ppm, ср. 1176 ppm), Sr (532–760 ppm, ср. 641 ppm), Rb (98–139 ppm, ср. 121 ppm) и невысокие – высокозарядных Zr (93–170 ppm, ср. 143 ppm), Nb (9–14 ppm, среднее 11 ppm), Y (3.7–9.3 ppm) с очень высоким

отношением Sr/Y = 65–168. Гранодиориты характеризуются невысокими концентрациями редкоземельных элементов ($\Sigma\text{REE} = 66\text{--}131$ ppm, среднее 102 ppm) с обогащением LREE [(La/Yb) $n = 16.1\text{--}42.9$] и умеренным их фракционированием [(La/Sm) $n = 4.4\text{--}7.7$] (табл. 1, рис. 9 а). Спектры распределения РЗЭ, нормированные к хондриту [19], имеют отрицательный

наклон в области LREE и довольно пологий для HREE (рис. 9 а). Выраженная Eu аномалия отсутствует (Eu/Eu* = 0.84–1.37). На мультиэлементной спайдердиаграмме, нормализованной к составу примитивной мантии [20], все образцы обнаруживают положительный пик Pb, отрицательные аномалии Nb, слабо отрицательные P и Ti (рис. 9 б).

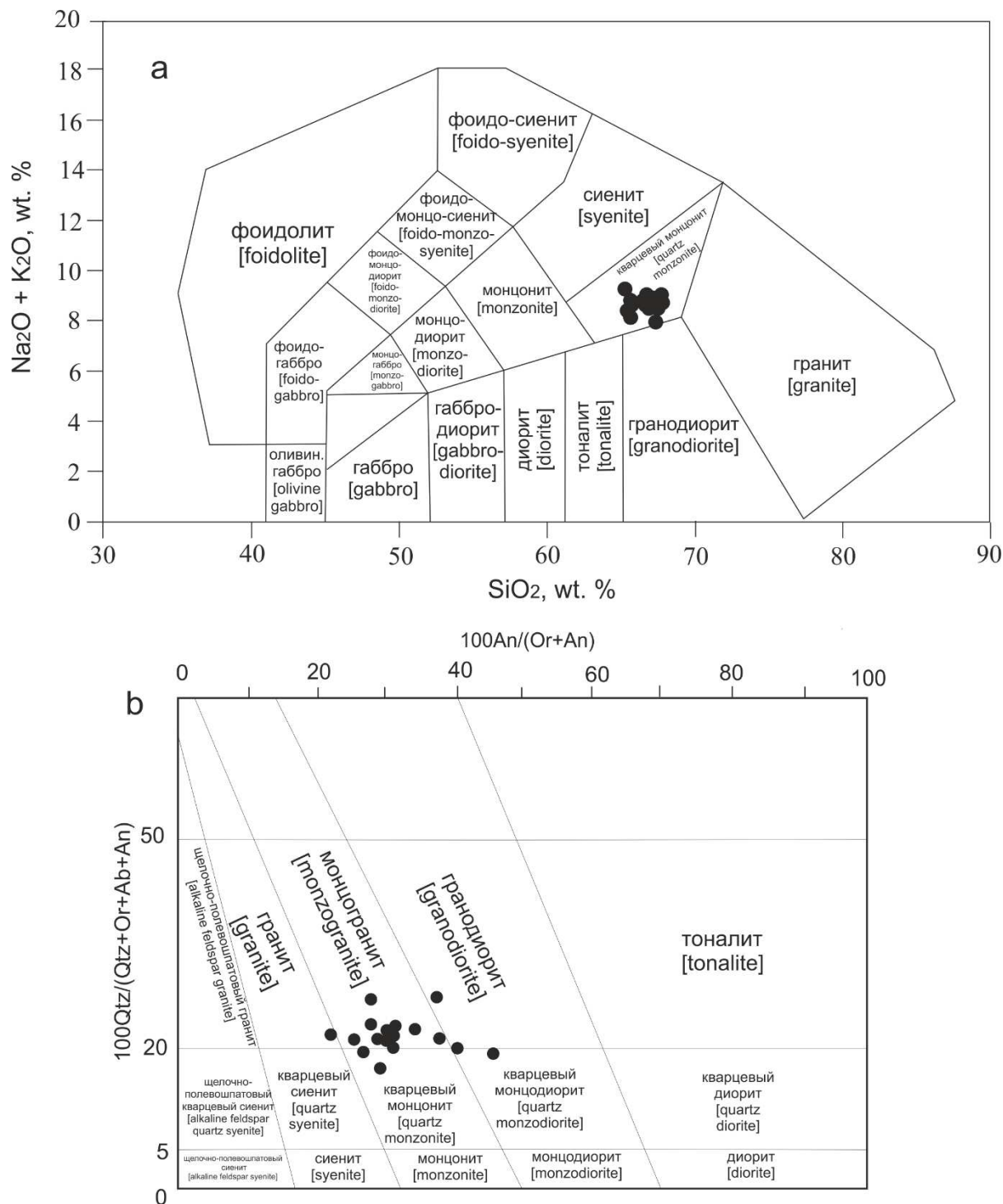


Рис. 7. Составы гранодиоритов Луневского массива на классификационных диаграммах: а) $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ [17]; б) $100\text{An}/(\text{Or} + \text{An}) - 100\text{Qtz}/(\text{Qtz} + \text{Or} + \text{Ab} + \text{An})$ [18].
 [Fig. 7. Classification diagrams for granodiorites of the Lunevsky Massif: a) $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ [17]; б) $100\text{An}/(\text{Or} + \text{An}) - 100\text{Qtz}/(\text{Qtz} + \text{Or} + \text{Ab} + \text{An})$ [18].]

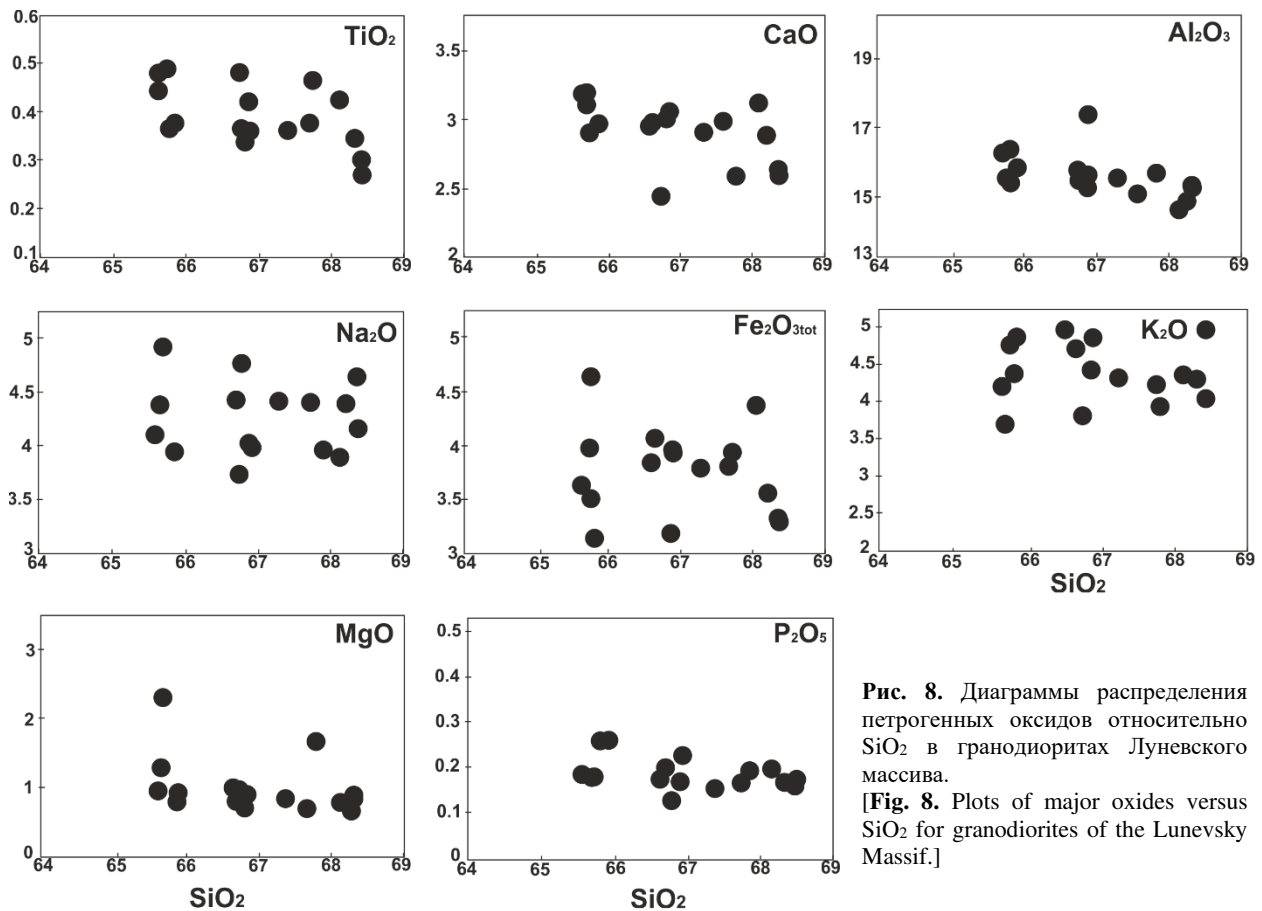


Рис. 8. Диаграммы распределения петрогенных оксидов относительно SiO₂ в гранодиоритах Луневского массива.
[Fig. 8. Plots of major oxides versus SiO₂ for granodiorites of the Lunevsky Massif.]

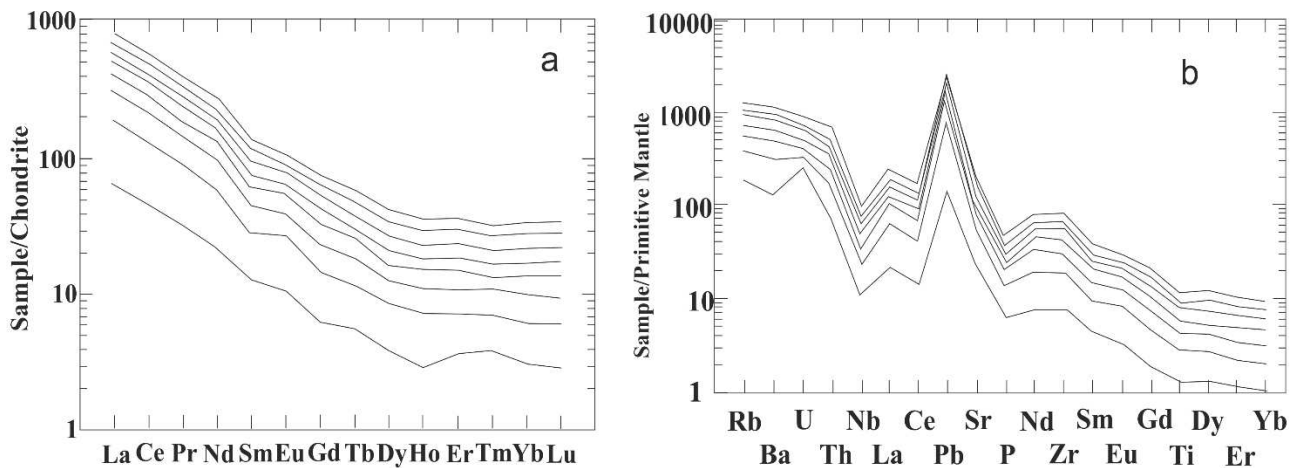


Рис. 9. Нормализованное к хондриту распределение редкоземельных (а) и нормализованное к примитивной мантии распределение малых и редких (б) элементов в гранодиоритах Луневского массива (данные по валовому составу пород).
[Fig. 9. Chondrite-normalized REE patterns (a) and Primitive mantle-normalized multi-element patterns (b) for the Lunevsky Massif granodiorites (data are for bulk-rock samples).]

U-Pb геохронология

Нами были выполнены определения возраста циркона на ионном микрозонде SHRIMP-II для пробы гранодиоритов 4006/252.5 (скважина 4006, глубина 252.5). Циркон рыже-коричневого цвета, полупрозрачный, представлен идиоморфными и субидиоморфными призматическими полупрозрачными кристаллами светло коричневой окраски, размером 80–200 мкм с коэффициентом удлинения 1.5–4.0

(рис. 10). Присутствуют многочисленные твердофазные включения. В катодолюминесценции видна структура роста – тонкая концентрическая осцилляторная зональность. Явных унаследованных ядер не выявлено. Структурные и морфологические признаки указывают на магматическую природу циркона и практическое отсутствие значительных наложенных событий. Содержание U = 156–904, Th = 63–540, Th/U = 0.25–0.77.

Табл. 1. Содержание петрогенных оксидов, редких и редкоземельных элементов в гранодиоритах Луневского массива
 [Table 1. Major oxides, trace and rare earth elements concentrations in the Lunevsky Massif granodiorites]

Скв./глуб. [Drill hole/depth]	4001/ 220	4001/ 309.8	4001/ 317.5	4001/ 326	4001/ 329	4001/ 338.7	4003/ 218	4003/ 221	4003/ 225	4006/ 252.5	4006/ 327	4006/ 360.9	4006/ 380.4	4006/ 389	4006/ 398	4008/ 217.8	4008/ 226.5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
SiO ₂	68.41	67.30	66.66	68.41	65.73	66.92	67.67	68.05	68.30	66.83	66.94	66.73	65.72	67.93	65.92	65.76	65.64
TiO ₂	0.30	0.35	0.36	0.26	0.36	0.35	0.37	0.42	0.34	0.33	0.42	0.47	0.49	0.46	0.36	0.47	0.44
Al ₂ O ₃	14.97	15.43	15.58	15.18	16.40	15.20	15.16	14.41	15.10	17.80	15.51	15.28	15.35	15.61	15.98	16.25	16.26
Fe ₂ O _{3tot}	3.29	3.71	3.73	3.28	3.52	3.96	3.78	4.30	3.52	3.17	3.83	4.04	4.66	3.85	4.17	3.93	3.57
MgO	0.70	0.72	0.74	0.71	0.71	0.69	0.72	0.70	0.66	1.00	0.94	1.01	1.18	1.62	0.93	2.27	0.93
MnO	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.04	0.06	0.06	0.07	0.05	0.06	0.05	0.05
CaO	2.54	2.87	2.99	2.56	2.89	3.03	2.97	3.13	2.72	2.33	2.90	2.99	3.08	2.55	2.90	3.21	3.25
Na ₂ O	4.12	4.42	4.41	4.57	4.88	4.05	4.39	3.86	4.34	4.76	3.99	3.66	3.33	3.97	3.92	4.30	4.05
K ₂ O	4.88	4.30	4.59	3.93	4.39	4.82	4.11	4.37	4.34	3.62	4.45	4.61	4.72	3.79	4.82	3.58	4.21
P ₂ O ₅	0.15	0.15	0.17	0.16	0.16	0.16	0.17	0.19	0.15	0.11	0.22	0.20	0.25	0.17	0.23	0.16	0.18
III [LOI]	0.45	0.28	0.30	0.56	0.74	0.46	0.30	0.34	0.37	0.52	0.46	0.66	0.80	H.o. [N/A]	0.37	H.o. [N/A]	1.15
Сумма [Total]	99.89	99.59	99.59	99.67	99.90	99.71	99.68	99.85	99.90	99.63	99.86	99.81	99.80	99.75	99.85	97.12	99.89
X _{Mg}	0.30	0.28	0.28	0.30	0.29	0.26	0.27	0.24	0.27	0.38	0.33	0.33	0.33	0.45	0.31	0.53	0.34
K ₂ O/Na ₂ O	1.18	0.97	1.04	0.86	0.90	1.19	0.94	1.13	1.00	0.76	1.12	1.26	1.42	0.95	1.23	0.83	1.04
K ₂ O+Na ₂ O	9.00	8.79	9.00	8.50	9.27	8.87	8.50	8.23	8.68	8.38	8.44	8.27	8.05	7.76	8.74	7.88	8.26
A/CNK	0.90	0.90	0.88	0.92	0.91	0.87	0.89	0.86	0.90	1.11	0.93	0.93	0.95	1.02	0.94	0.97	0.95
T _{Zr} °C	906		951		968		977		950	993				995		986	
T _{SiO2} °C	754	770	779	754	792	775	765	759	756	777	775	778	792	761	790	792	794
Li										37.2				34.6		35.2	
I	2.19		1.91		2.66		2.27			2.0				2.3		2.3	
Sc	2.09		2.22		1.62		2.44		2.36	4.2				3.9		4.6	
V	30.6		35.3		43.5		44.8			33.3				34.6		48.2	
Cr	31.0		37.6		42.8		47.9		39.1	4.2				9.1		21.3	
Co	3.76		5.57		4.72		5.07			6.7				7.1		8.4	
Ni	6.88		7.01		8.01		7.17		7.48	8.8				8.0		11.4	
Cu	58.0		38.9		45.2		29.4			26.7				36.7		30.1	
Zn	48.5		68.5		67.1		53.5			51.4				55.7		53.0	
Ga	17.3		17.9		18.8		17.8		10.6	15.4				14.3		17.1	
Rb	130		135		126		119		-	97.5				139		98.3	
Sr	532		714		760		638		622	610				654		595	
Y	5.82		5.54		6.28		6.22		3.71	9.3				9.2		9.1	

Продолжение Табл. 1
[Continued Table 1]

Zr	93.2	127	143	151	127	168	170	161
Nb	9.07	9.55	9.28	10.1	9.96	12.4	13.8	12.1
Mo	0.87	<0.6	0.64	0.67	<0.5	0.69	0.42	0.45
Cs	3.53	4.98	4.16	3.40	0.44	2.8	7.9	5.4
Ba	1010	1360	1320	1050	1060	1553	1041	1011
La	16.3	29.3	31.5	22.1	27.0	20.2	23	31.7
Ce	29.1	50.8	58.4	38.3	51.9	37.1	42.0	60.3
Pr	3.21	5.30	5.84	3.91	5.62	4.1	4.6	6.2
Nd	11.0	16.7	20.8	13.7	17.7	15.7	16.8	21.6
Sm	2.03	2.47	2.83	2.17	2.46	3.0	2.9	3.2
Eu	0.62	0.91	0.88	0.75	0.68	0.85	0.74	0.78
Gd	1.30	1.74	2.12	1.72	2.12	2.3	2.3	2.5
Tb	0.21	0.23	0.29	0.23	0.20	0.32	0.33	0.35
Dy	1.02	1.19	1.12	0.86	1.15	1.7	1.8	1.8
Ho	0.17	0.25	0.22	0.22	0.15	0.32	0.33	0.34
Er	0.60	0.58	0.65	0.68	0.55	0.92	0.96	0.92
Tm	0.10	0.082	0.10	0.053	0.078	0.13	0.14	0.13
Yb	0.55	0.49	0.67	0.63	0.53	0.9	0.96	0.9
Lu	0.074	0.076	0.094	0.10	0.095	0.13	0.14	0.14
Hf	2.80	3.86	4.34	4.37	3.47	4.6	4.7	4.3
Ta	1.09	0.86	0.78	0.94	0.97	1.2	1.2	1.1
W	<0.5	0.51	0.72	<0.5	0.32	0.78	0.91	0.58
Pb	27.9	121	154	102		19.2	20.7	19.0
Bi	H.o. [N/A]	H.o. [N/A]	H.o. [N/A]	H.o. [N/A]		0.13 [N/A]	0.15 [N/A]	0.095 [N/A]
Th	6.71	8.56	9.60	6.75		7.2	9.74	12.6
U	5.32	2.35	2.42	2.64		2.1	1.7	3.6
ΣREE	66.3	110.1	125.5	85.4	110.2	87.7	97.0	130.9
Eu/Eu*	1.17	1.34	1.10	1.19	0.91	0.99	0.88	0.84
(Gd/Yb) ^h	1.96	2.94	2.62	2.26	3.31	2.11	1.98	2.30
(La/Yb) ^h	21.3	42.9	33.7	25.2	36.5	16.1	17.2	25.3
(La/Sm) ^h	5.18	7.66	7.19	6.57	7.09	4.35	5.12	6.40
Rb/Ba	0.13	0.10	0.10	0.11		0.06	0.13	0.10
Ba/Sr	1.9	1.9	1.7	1.7	1.7	2.6	1.6	1.7
Sr/Y	91	129	121	103	168	66	71	65
La/Yb	30	60	47	35	51	41	44	35
Yb/Lu	7.4	6.5	7.1	6.3	5.6	6.9	6.9	6.4
Nb/Ta	8.3	11.1	11.9	10.7	10.3	10.3	11.5	11.0
Y _n	1.12	0.99	1.36	1.28	1.08	1.83	1.95	1.83

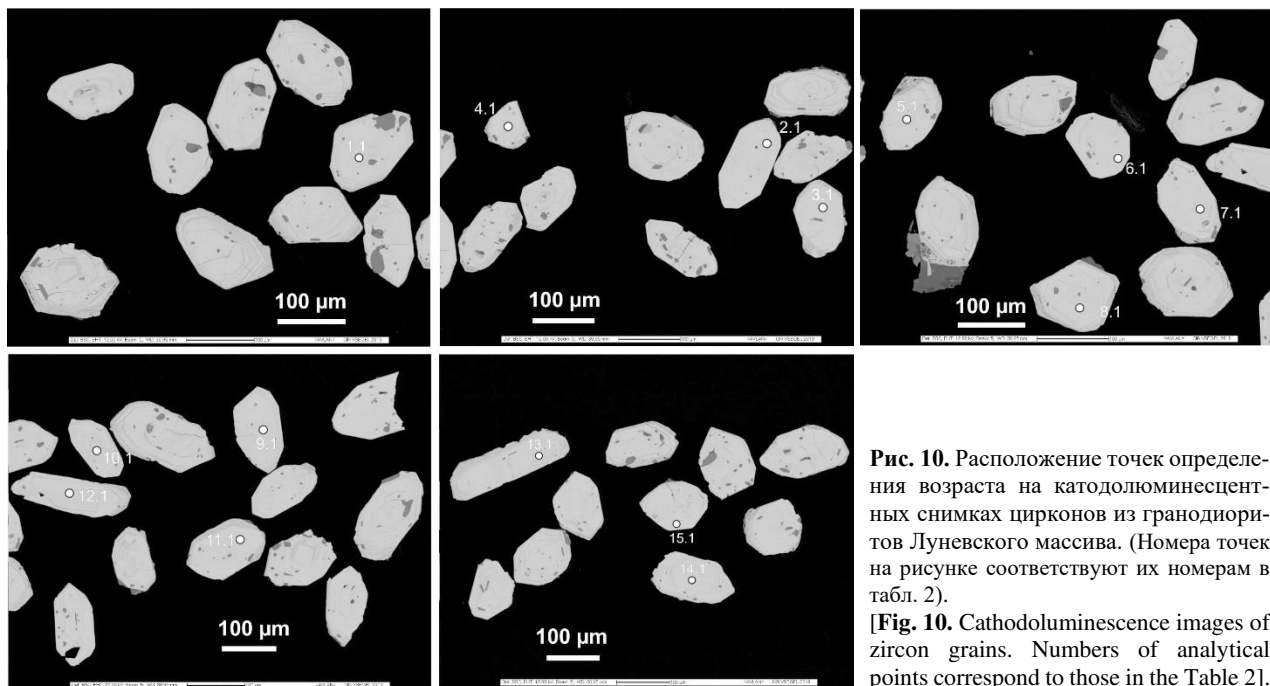


Рис. 10. Расположение точек определения возраста на катодолуминесцентных снимках цирконов из гранодиоритов Луневского массива. (Номера точек на рисунке соответствуют их номерам в табл. 2).
[Fig. 10. Cathodoluminescence images of zircon grains. Numbers of analytical points correspond to those in the Table 2].

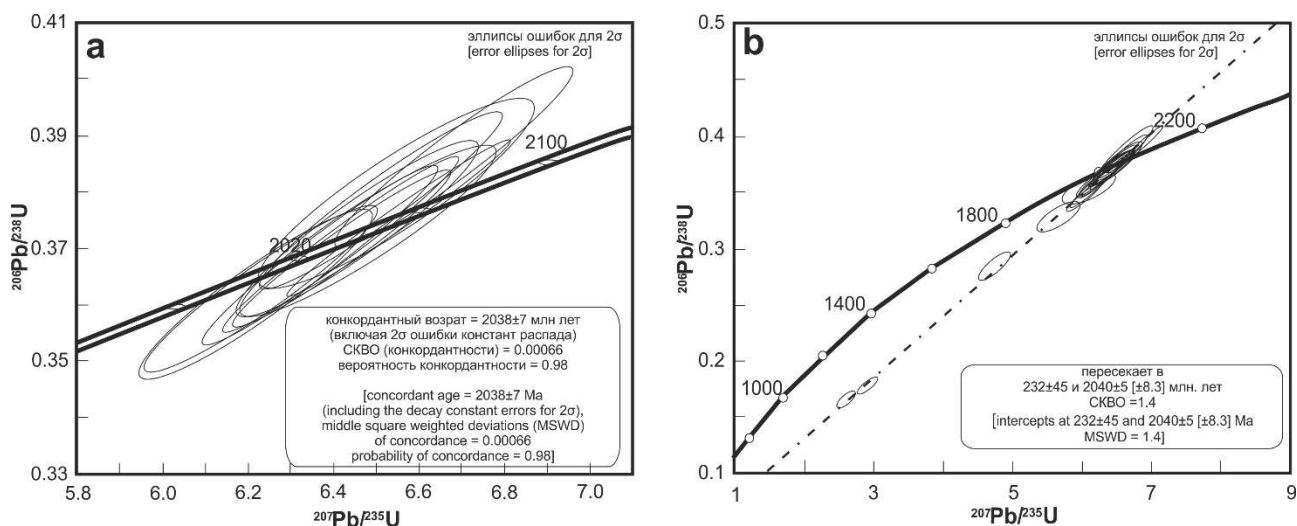


Рис. 11. Результаты U-Pb датирования цирконов из гранитов гранодиоритов Луневского массива методом SIMS.
[Fig. 11. The results of U-Pb SIMS analyses of zircons from granodiorites of the Lunevsky Massif.]

Было выполнено 20 анализов в 18 зернах (рис. 10, табл. 2). Все результаты на графике с конкордией аппроксимируются единой линией регрессии (рис. 11 а). Невысокая девиация точек от линии регрессии (СКВО = 1.4) предполагает минимальные воздействия докембрийских процессов на данные цирконы. Возраст по верхнему пересечению с конкордией (20 анализов) составляет 2040 ± 5 млн лет. Значения, полученные по нижним пересечениям дискордии, учитывая сложную историю пород, вероятнее всего не имеют геологического смысла. Этот возраст совпадает с рассчитанным конкордантным возрастом 2038 ± 7 млн лет (11 анализов, СКВО = 0.00066; вероятность конкордантности 0.98) (рис. 11 б).

Lu-Hf и Sm-Nd изотопная систематика

Изотопный состав Hf был определен в цирконе из образца 4006/252.5 и анализировался в тех же точках, где измерялся U-Pb изотопный возраст. В отличие от U-Pb изотопной системы, которая во всех зернах циркона имеет близкий возраст, Lu-Hf изотопная система в тех же зернах демонстрирует широкие вариации изотопного состава гафния при расчете на этот возраст ($\epsilon_{\text{Hf}(2040)}$ от -2.0 до -12.4) (табл. 3, рис. 12). Модельные возрасты $T_{\text{Hf}}(\text{C})$, рассчитанные по двухстадийной модели, варьируют от 2794 до 3429 млн лет. Среди них преобладают модельные возрасты, предполагающие довольно длительную коровую предысторию их протолитов (рис. 12).

Табл. 2. Результаты U-Pb изотопного датирования циркона из гранодиорита Луневского массива (обр. 4006/252.5)
 [Table 2. The results of U-Pb isotope dating of zircon from the Lunevsky Massif granodiorite (sample 4006/252.5)]

Точка [Spot]	% $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	U, мкг/г [U, ppm]	Th, мкг/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]	(1) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст [(1) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age]	D, %	Общий ^{238}U [Total ^{238}U]	Общий $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ [Total $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$]	% $^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	(1) $^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	% $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	(1) $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	Корр. ошб. [Err. corr.]				
18.1	2,95	904	222	0,25	132	986	15	1864	23	89	5,869	1,7	0,13742	0,47	2,599	2,1	0,1654	1,7	,796
17.1	2,20	680	228	0,35	106	1055	16	1941	21	84	5,501	1,7	0,13641	0,51	2,916	2	0,1778	1,7	,819
10.1	1,51	487	188	0,40	120	1608	24	1978	16	23	3,476	1,7	0,13418	0,47	4,744	1,9	0,2833	1,7	,875
4.1	0,86	491	183	0,39	139	1826	26	2034	27	11	3,028	1,7	0,1327	1,2	5,66	2,2	0,3274	1,7	,741
3.1	0,17	705	371	0,54	210	1921	27	2044,8	75	6	2,877	1,6	0,12758	0,37	6,04	1,7	0,3471	1,6	,968
7.1	0,22	258	118	0,47	78,1	1941	28	2036	12	5	2,84	1,7	0,12747	0,6	6,08	1,8	0,3513	1,7	,921
8.1	0,93	638	236	0,38	195	1947	28	2035	34	5	2,81	1,6	0,1335	1,4	6,1	2,5	0,3526	1,7	,653
11.1	0,06	387	162	0,43	120	1990	28	2025	12	2	2,763	1,7	0,12523	0,68	6,22	1,8	0,3617	1,7	,921
1.1	0,16	372	169	0,47	116	1993	29	2025,8	10	2	2,755	1,7	0,12615	0,5	6,23	1,8	0,3624	1,7	,948
5.1re	0,05	485	233	0,50	154	2023	31	2033,2	76	0	2,711	1,8	0,12575	0,4	6,37	1,8	0,3687	1,8	,972
2.1	0,00	461	192	0,43	146	2027	29	2040,8	77	1	2,707	1,6	0,12587	0,44	6,41	1,7	0,3695	1,6	,967
11.1re	0,05	388	154	0,41	124	2034	29	2038,9	8,9	0	2,694	1,7	0,12616	0,46	6,43	1,7	0,3711	1,7	,956
6.1	0,10	441	175	0,41	142	2044	30	2041	12	0	2,678	1,7	0,12674	0,6	6,48	1,9	0,373	1,7	,936
13.1	0,15	283	138	0,50	91	2047	30	2033	12	-1	2,672	1,7	0,12659	0,6	6,46	1,8	0,3736	1,7	,929
5.1	0,02	764	540	0,73	246	2050	29	2054,3	64	0	2,67	1,6	0,12696	0,35	6,55	1,7	0,3745	1,6	,977
15.1	0,09	445	185	0,43	145	2069	30	2026,3	9,4	-2	2,64	1,7	0,12566	0,49	6,51	1,8	0,3784	1,7	,953
16.1	0,07	156	63	0,41	51	2073	31	2032	16	-2	2,634	1,8	0,1258	0,85	6,55	2	0,3794	1,8	,891
9.1	0,09	394	200	0,52	131	2104	30	2035,8	9,3	-3	2,588	1,7	0,12632	0,49	6,68	1,7	0,386	1,7	,954
12.1	0,11	173	129	0,77	58,4	2128	35	2021	14	-5	2,554	2	0,12548	0,72	6,71	2,1	0,3911	2	,927
14.1	0,02	519	279	0,56	176	2147	30	2056,5	7,8	-4	2,529	1,7	0,12719	0,42	6,92	1,7	0,3953	1,7	,966

Примечание: ошбоки 1σ. Pb_c и Pb* - первичный и радиогенный свинец, соответственно. Ошбока в стандартной калибровке 0,53 %. (1) Первичный Pb скорректирован на измеренный ^{204}Pb . D, % - процент дискордантности.

[Note: errors are 1σ. Pb_c and Pb* indicate the common and radiogenic portions, respectively. Errors in Standard calibration was 0,53 %. (1) Common Pb corrected using measured ^{204}Pb . D, % - % Discordant.

Табл. 3. Lu-Hf изотопный состав шпрона из гранодиорита Луневского массива (образец 4006/252.5)
 [Table 3. Lu-Hf isotope compositions of zircon from the Lunevsky Massif granodiorite (sample 4006/252.5)]

Точка [Spot]	Возраст (млн. лет) [Age (Ma)]	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{178}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\pm 2\sigma$	*TDM	*Tc
1.1	2026	0.028587	0.000196	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	1.467391	0.000079	0.281299	-6.9	1.2	2667	3073
2.1	2041	0.029580	0.000301	0.000042	0.000042	0.000042	0.000042	0.000042	1.467331	0.000083	0.281363	-4.8	1.5	2601	2955
3.1	2045	0.050710	0.000298	0.000051	0.000051	0.000051	0.000051	0.000051	1.467245	0.000127	0.281424	-2.0	1.8	2503	2794
5.1re	2054	0.026912	0.000156	0.000096	0.000096	0.000096	0.000096	0.000096	1.467278	0.000247	0.281127	-12.4	3.5	2896	3429
6.1	2041	0.033615	0.000547	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	1.467312	0.000103	0.281229	-9.1	1.2	2761	3222
7.1	2036	0.026010	0.000341	0.000033	0.000033	0.000033	0.000033	0.000033	1.467238	0.000074	0.281247	-8.5	1.2	2739	3181
8.1	2035	0.026485	0.000118	0.000030	0.000030	0.000030	0.000030	0.000030	1.467097	0.000088	0.281223	-9.5	1.0	2774	3241
9.1	2036	0.035265	0.001922	0.000040	0.000040	0.000040	0.000040	0.000040	1.467333	0.000119	0.281260	-8.1	1.4	2724	3159
11.1re	2039	0.028413	0.000145	0.000042	0.000042	0.000042	0.000042	0.000042	1.467317	0.000099	0.281276	-7.4	1.5	2695	3113
14.1	2057	0.035104	0.000163	0.000051	0.000051	0.000051	0.000051	0.000051	1.467178	0.000144	0.281225	-9.5	1.8	2780	3249
15.1	2026	0.046062	0.002054	0.000046	0.000046	0.000046	0.000046	0.000046	1.467446	0.000115	0.281322	-5.3	1.6	2639	3007
		0.030126	0.000587	0.000038	0.000038	0.000038	0.000038	0.000038	1.467364	0.000099	0.281283	-7.6	1.4	2695	3119

*Примечание: первичное отношение изотопов гафния $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ рассчитано с использованием константы распада ^{176}Lu $\lambda = 1.867 \cdot 10^{-11}$; Tc модельный возраст источника, рассчитанный по двухстадийной модели с использованием $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$, основанной на выплавлении магмы из средней континентальной коры, образованной из деплетированной мантии. TDM модельный возраст источника, рассчитанный по одностадийной модели, основанной на выплавлении магмы из деплетированной мантии.
 [* $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ primary ratio is calculated using the decay constant ^{176}Lu $\lambda = 1.867 \cdot 10^{-11}$; Tc is the model age of the source calculated from the two-stage model using $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$, based on the magma melting from the intermediate continental crust formed from the depleted mantle. TDM is the model age of the source calculated taking into account the magma melting from depleted mantle for metabasites.]

Таблица 4. Sm-Nd изотопные данные для гранодиоритов Стоило-Николаевского комплекса
 [Table 4. Sm-Nd isotopic data for the Stoilo-Nikolaev complex granodiorites]

Номер образца [Sample number]	Массив [Massif]	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]	$\epsilon_{\text{Nd}}(T)$	TNa(DM)***
4006/252.5	Луневский [Lunevsky]	2.845	17.88	0.0962	0.511107	2040	-3.6	2638
3617/178	Роговский [Rogovoe]	6.62	37.84	0.1058	0.511106	2050	-6.0	2872
3126/361.7	Екатериновский [Ekaterinovskiy]	5.25	29.53	0.1077	0.511125	2050	-6.1	2896
3507/237	С.-Шигровский [Northern Shigruy]	7.78	38.84	0.1210	0.511140	2050	-9.3	3283

* Погрешность $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ принята не более 0.2%. ** Возраст по данным U-Pb датирования [1 и настоящая статья]. *** Модельный возраст по [21].
 [* $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ error is considered less than 0.2%. ** Age according to U-Pb dating [1 and this study] *** Model age according to [21].

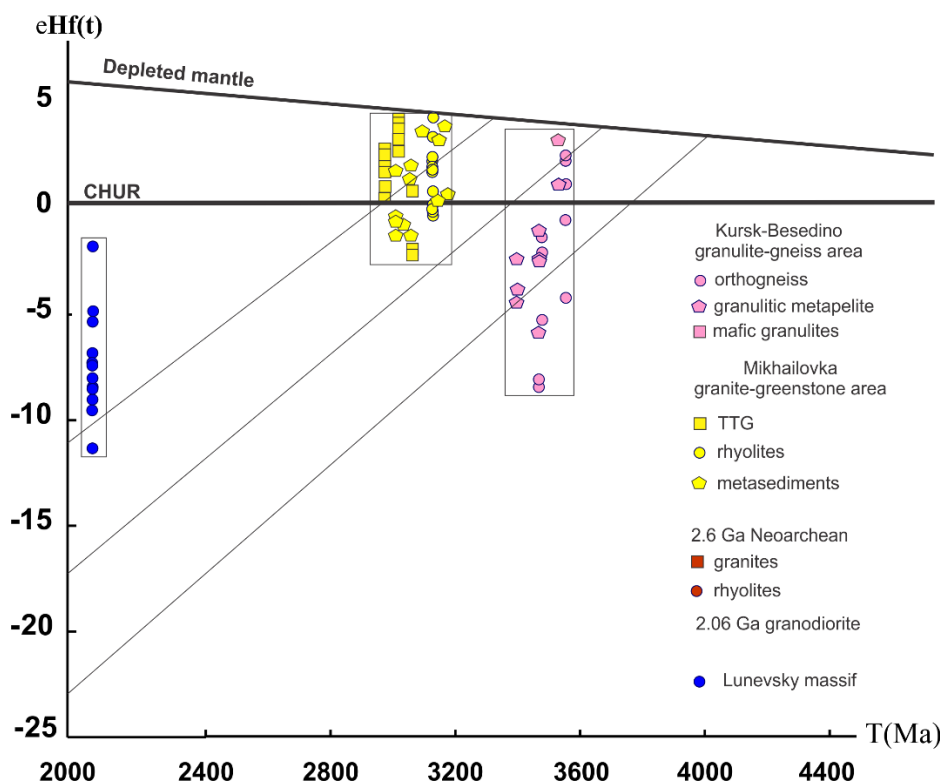


Рис. 12. Диаграмма $\epsilon\text{Hf}(t) - T$ для циркона из гранодиоритов Луневского массива. [Fig. 12. Plots of $\epsilon\text{Hf}(t)$ values versus zircon ages for zircon grains from granodiorites of the Lünevsky Massif.]

Изотопный состав Nd был измерен в валовой пробе того же гранодиорита 4006/252.5. Значение $\epsilon\text{Nd}(2040)$ составляет (-3.6), а модельный возраст $\text{TNd}(\text{DM}) = 2638$ млн лет (табл. 4).

Обсуждение результатов Геохимическая типизация

По минеральному составу и геохимическим характеристикам гранодиориты Луневского массива принадлежат к гранитоидам I-типа, которые по геохимии близки к породам вулканических дуг. Массив сложен только биотитовыми гранодиоритами, в них отсутствует мусковит и сопровождающие интрузию пегматитовые тела. Они являются в основном метаглиноземистыми, железисто-магнезиальными (рис. 4, 5) и, несмотря на высокое содержание щелочей, имеют близкие концентрации калия и натрия. Породы относятся к известково-щелочной серии (рис. 6), обогащены литофильными элементами Rb, Ba, Sr, обеднены PЗЭ и высокозарядными элементами. В них отсутствует выраженная европиевая аномалия (рис. 9 а), но есть сильная положительная аномалия Pb и отрицательная -Ti (рис. 9 б). Эти признаки характерны для гранитов I-типа [22] и отличают их от калиевых, перглиноземистых мусковитовых гранитов S-типа и высоко железистых, обогащенных PЗЭ и высокозарядными элементами гранитов А-типа. Кроме того, для гранитов А- и S-типов характерны отрицательные Eu аномалии. Спецификой гранодиоритов I-типа Луневского массива являются высокие содержания щелочей и низкие - «мафических элементов» Cr и Ni.

На дискриминантных диаграммах для выделения гранитов А-типа $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{CaO} - \text{Zr-Nb-Ce-Y}$, Ce-Zr и $\text{FeO}/\text{MgO} - \text{Zr-Nb-Ce-Y}$ [23] точки составов

гранодиоритов Луневского массива попадают в объединенные поля гранитов I, S и М типов (рис. 13, 14). Кроме того, такие геохимические характеристики, как высокие содержания Al_2O_3 (≥ 15 мас. %), Sr (ср. 640 ppm), низкие содержания Y (< 10 ppm) и HREE, а также отсутствие Eu* аномалий сближает их с гранитоидами адакитовых серий. На дискриминантных диаграммах [24, 25] точки составов гранодиоритов ложатся в поля адакитов (рис. 15).

P-T условия кристаллизации магм

Наиболее широко для оценки температуры гранитоидных магм используют термометрию по насыщенности расплавов Zr, основанную на результатах экспериментальных калибровок [26, 27, 28], поскольку циркон является одним из самых ранних кристаллизующихся минералов. В целом для метаглиноземистых гранодиоритов I-типа Луневского массива применим этот метод, поскольку все цирконы являются ликвидусными фазами, образуют идиоморфные кристаллы и не содержат унаследованных ядер, фиксируя возраст магматизма 2040 млн лет (рис. 10, 11). Температуры насыщения цирконием, условно принимаемые как минимальные ликвидусные, оказались очень высокими и находятся в интервале 906–986°C (n=8), при среднем значении 966°C (табл. 1).

Кроме того, мы использовали недавно предложенный простой эмпирический термометр по оценке температур кристаллизации гранитоидов по содержанию SiO_2 в породе, на основе экспериментально определенного фазового равновесия $T \propto 1/\text{SiO}_2$ [29]. Температуры кристаллизации гранодиоритов составляют 754–794°C (n=17) (табл. 1).

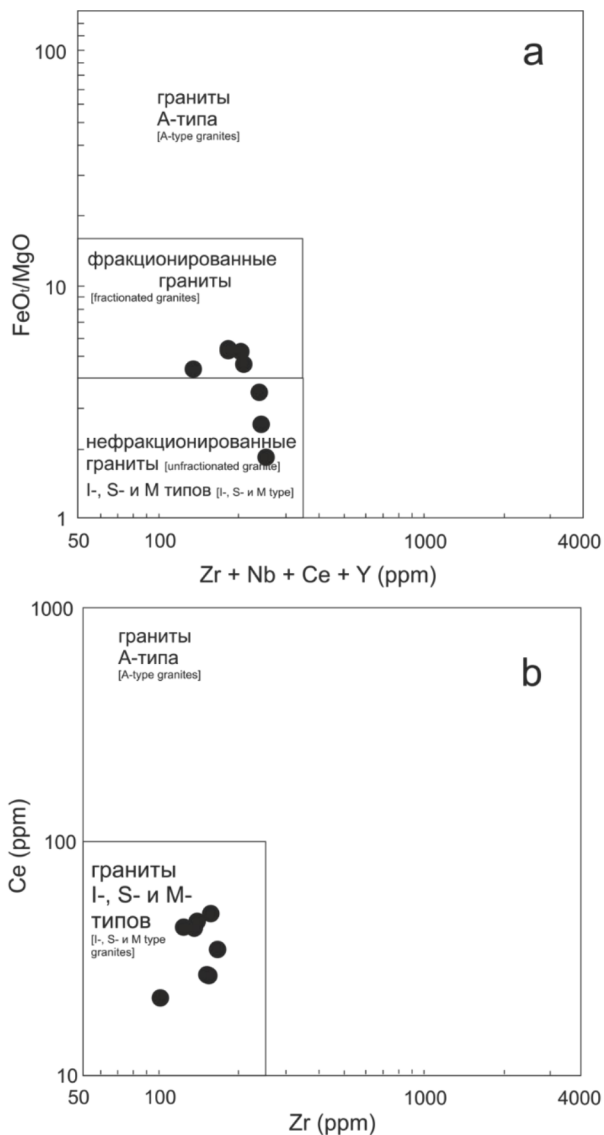


Рис. 13. Составы гранодиоритов Луневского массива на дискриминантных диаграммах FeO/MgO – Zr-Nb-Ce-Y и Ce-Zr [23].
[Fig. 13. Discrimination diagrams FeO/MgO – Zr-Nb-Ce-Y и Ce-Zr [23] for the granodiorites of the Lunevsky Massif.]

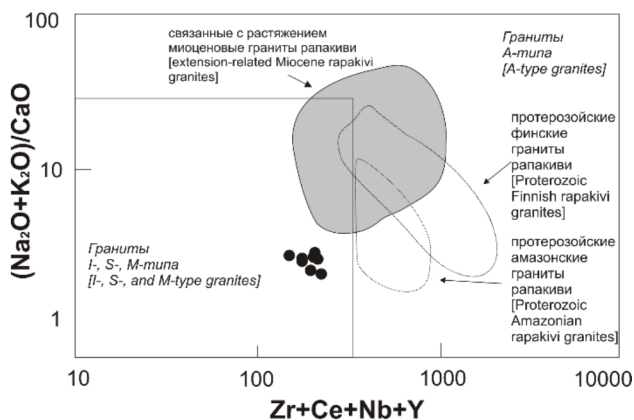


Рис. 14. Составы гранодиоритов Луневского массива на дискриминантной диаграмме (Na₂O + K₂O)/CaO – Zr-Nb-Ce-Y [23].
[Fig. 14. Discrimination diagram (Na₂O + K₂O)/CaO – Zr-Nb-Ce-Y [23] for the granodiorites of the Lunevsky Massif.]

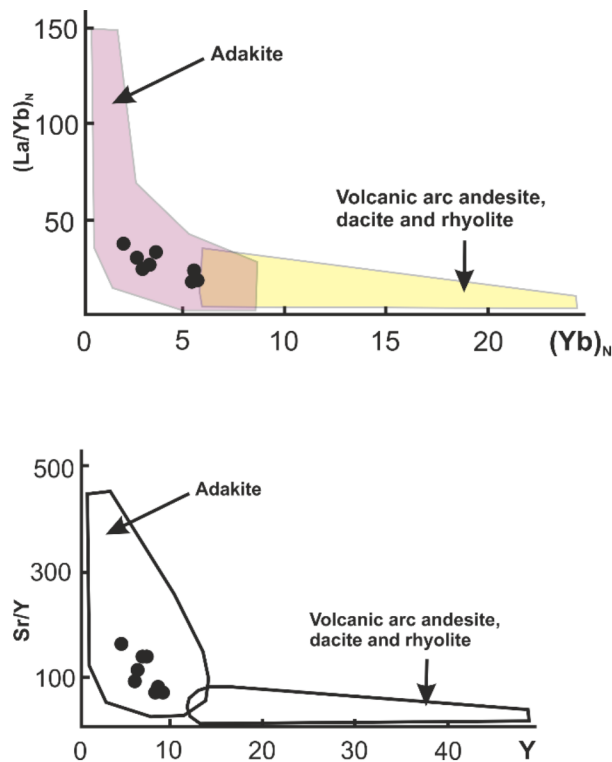


Рис. 15. Составы гранодиоритов Луневского массива на дискриминантных диаграммах для пород адакитовых серий.
[Fig. 15. Adakite discrimination diagrams [24, 25] for the granodiorites of the Lunevsky Massif.]

Источники расплавов

Lu-Hf изотопные анализы выявили широкие вариации изотопного состава гафния в отдельных зернах магматического циркона из гранодиорита (табл. 3, рис. 12). Это, возможно, отражает Lu-Hf гетерогенность среды кристаллизации цирконов, унаследованную от разных по составу и возрасту пород в корово-мантийном источнике. Широкий диапазон изотопного состава Hf и модельных возрастов (табл. 3), более радиогенный состав Nd, чем в других массивах гранодиоритов в Тим-Ястребовской структуре (табл. 4) исключают механизм фракционной кристаллизации и контаминации (AFC) единого исходного расплава. К тому же, выплавление гранитоидов при фракционировании базальтовых расплавов сопровождалось бы удалением плагиоклаза с образованием отрицательных Eu* аномалий и сильным обеднением Sr [30], чего не наблюдается в гранодиоритах Луневского массива. Поэтому мы полагаем, что существовало несколько независимых источников гранодиоритовых магм. Следовательно, в петрогенезисе гранодиоритов Луневского массива участвовало, как минимум два контрастных по изотопно-геохимическим характеристикам источника магм: палеоархейские коровые и палеопротерозойские мантийные субстраты. Палеоархейские ТГП с возрастом 3.3–3.5 млрд лет [31] являются древним фундаментом для палеопротерозойских вулканогенно-осадочных толщ, выполняющих Тим-Ястребовскую внутриконтинентальную рифтогенную структуру и, несомненно, участвовали в петрогенезисе гранодиоритов, обеспе-

чивая в них низкорadioгенную компоненту изотопного состава Hf.

Другим источником являются палеопротерозойские мантийные расплавы, о чем прямо свидетельствуют диориты в других диорит-гранодиоритовых массивах (Роговский, Северошигровский) и интрузии габброидов в Тим-Ястребовской структуре. Ранее нами изучался петрогенезис андезитовых порфиритов (палеовулкан) с возрастом 2067 млн лет северо-западнее Тим-Ястребовской структуры, также имеющих адакитовые характеристики, но с двумя контрастными кластерами изотопного состава Hf (от +3,3 до +6,8 и от -12,7 до -13,3) [7, 32]. Был сделан вывод, что адакитовые сигнатуры порфиритов возникли в результате двухстадийного процесса ассимиляции коровых пород мантийным расплавом в основании деламинарованной коры и кристаллизационной дифференциации базальтовых магм в верхнекоровых магматических камерах.

Гранодиориты I-типа занимают посттектоническую позицию. Их внедрением 2.04–2.07 млрд лет назад завершились субдукционные и коллизионные процессы в интервале 2.1–2.07 млрд лет. Гранодиориты Луневского массива находятся значительно ближе к границе архейского Курского блока и палеопротерозойского Волго-Донского орогена, чем андезитовые порфириты. Волго-Донской ороген сложен палеопротерозойскими ювенильными осадочно-вулканогенными и интрузивными комплексами [33]. Адакитовые геохимические характеристики гранодиоритов предполагают участие субдукционной компоненты во втором источнике. Отрыв субдуцируемой океанической плиты привел к образованию плитного окна (slab window), что инициировало апвеллинг астеносферной мантии и базальтовый магматизм с возрастом 2099 млн лет в Тим-Ястребовской структуре [34]. Таким образом, еще одним источником с ювенильными изотопными характеристиками могли быть мантийные магмы, возникшие при плавлении субдуцировавшей океанической литосферы Волго-Донского орогена под континентальную кору Курского блока.

Выводы

Гранодиориты Луневского массива в Тим-Ястребовской структуре являются метаглиноземистыми, железисто-магнезиальными породами известково-щелочной серии. Они обогащены литофильными и обеднены высокозарядными элементами и характеризуются сильно фракционированным распределением РЗЭ и отсутствием Eu аномалий. Наряду с этими признаками положительная аномалия Pb и отрицательная аномалия Ti позволяют отнести их к гранитоидам I-типа. Кроме того, в гранодиоритах установлены высокие значения отношений La/Yb и Sr/Y, что сближает их с гранитоидами адакитовых серий.

Возраст кристаллизации Луневского гранодиоритового массива составляет 2040 млн лет. Он имеет посттектоническую позицию. Постколлизионным магматизмом 2.04–2.07 млрд лет назад завершились субдукционные и коллизионные процессы в интервале 2.1–

2.07 млрд лет.

Изотопный состав Hf в цирконе указывает на участие в образовании гранодиоритового расплава нескольких источников, включающих коровые палеоархейские и ювенильные мантийные палеопротерозойские протолиты. Адакитовые характеристики гранодиоритов предполагают участие субдукционной компоненты во втором источнике. Ими могли быть (1) ТТГ, которые слагают древнее палеоархейское ядро Курского блока, и (2) мантийные магмы с ювенильными изотопными характеристиками, образовавшиеся при плавлении субдуцировавшей океанической литосферы Волго-Донского орогена.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
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. Кориш Е. Х., Савко К. А., Самсонов А. В., Червяковская М. В. Палеопротерозойские диориты Троснянского массива Курского блока Сарматии: U-Pb возраст, изотопная систематика и источники расплавов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2020. № 1. С. 87–99. DOI: 10.17308/geology.2020.1/2517
4. Цыбуляев С. В., Савко К. А., Кориш Е. Х., Червяковская М. В. Изотопно-геохимические особенности и геодинамическое положение пород шебекинского комплекса Курского блока восточной Сарматии // *Петрология и геодинамика геологических процессов: материалы XIII Всероссийского петрографического совещания (с участием зарубежных ученых)*. Иркутск, 6–13 сентября 2021. Т. 3. С. 196–198.
5. 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.
6. Цыбуляев С. В., Савко К. А. Геохимическая типизация палеопротерозойских вулканитов бимодальной серии курбакинской свиты Курского блока Восточной Сарматии // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2017. № 1. С. 61–75.
7. Цыбуляев С. В., Савко К. А. U-Pb Изотопный возраст и тектоническая позиция палеопротерозойских андезитовых порфиритов Курского блока Восточной Сарматии // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2018. № 3. С. 29–35. DOI: 10.17308/geology.2018.3/1559
8. Bogdanova S., Gorbatshev R., Grad M., Guterch A., Janik T., Kozlovskaya E., Motuza G., Skridlaite G., Starostenko V., Taran L. EUROBRIDGE: new insight into the geodynamic evolution of the East European Craton // *European Lithosphere Dynamics*.

- Eds.: Gee, D.G., Stephenson, R.A. *Geol. Soc. London Mem.* 2006. V. 32. P. 599–628. DOI: 10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.36
9. 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. *Geol. Soc. London Mem.* 2004. V. 30. P. 69–74. DOI: 10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.07
10. Steiger R. H., Jäger E. Subcommission of geochronology: convention of the use of decay constants in geo- and cosmochronology // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1976. V. 36. No. 2. P. 359–362. DOI: 10.1016/0012-821X(77)90060-7
11. Stacey J. S., Kramers I. D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1975. V. 26. No. 2. P. 207–221. DOI: 10.1016/0012-821X(75)90088-6
12. Ludwig K. SQUID 2: A User's Manual, rev. 12 Apr, 2009. Berkley Geochron. Ctr. Spec. Pub. 5. 2009. 110 p.
13. Jackson S. E., Norman J. P., William L. G., Belousova E. A. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology // *Chem. Geol.* 2004. V. 211. P. 47–69. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.017
14. Giovanardi T., Lugli F. The Hf-INATOR: a free data reduction spreadsheet for Lu/Hf isotope analysis // *Earth Sci. Informat.* 2017. V. 10. DOI: 10.1007/s12145-017-0303-9
15. Whitney D. L., Evans B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *Am. Mineral.* 2010. V. 95. P. 185–187. DOI: 10.2138/am.2010.3371
16. Frost B. R., Barnes C. G., Collins W. J., Arculus R. J., Ellis D. J., Frost C. D. A geochemical classification for granitic rocks // *Journal of Petrology.* 2001. V. 42. P. 2033–2048. DOI: 10.1093/petrology/42.11.2033
17. Cox K. G., Bell J. D., Pankhurst R. J. The interpretation of igneous rocks. London, Chapman & Hall, 1979. 450 p. DOI: 10.1007/978-94-017-3373-1
18. Middlemost E. A. K. Naming minerals in the magma/igneous rock system // *Earth Science Review.* 1994. V. 37. P. 215–224. DOI: 10.1016/0012-8252(94)90029-9
19. Boynton W. V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // *Rare earth element geochemistry*. Ed. P. Henderson. Amsterdam, Elsevier, 1984. P. 63–114. DOI: 10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3
20. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: Implication for mantle composition and processes // *Magmatism in Ocean Basins*. Eds.: Saunders, A.D., Norry, M.J. London, Geological Society, Special Publications. V. 42. P. 313–345. DOI: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
21. 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. V. 87. P. 249–265. DOI: 10.1016/0012-821X(88)90013-1
22. Liu X., Liu W., Si C. Petrogenesis and source rocks of the high-K calc-alkaline and shoshonitic I-type granitoids in the northwestern part of East Junggar, NWChina // *Lithos.* 2019. V. 326–327. P. 298–312. DOI: 10.1016/j.lithos.2018.12.033
23. Whalen J. B., Currie K. L., Chappell B. W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1987. V. 95. P. 407–419. DOI: 10.1007/BF00402202
24. Defant M. J., Drummond M. S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // *Nature.* 1990. V. 347. No. 4. P. 662–665. DOI: 10.1038/347662a0
25. Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids // *Lithos.* 1999. V. 46. P. 411–429. DOI: 10.1016/S0024-4937(98)00076-0
26. Watson E.B., Harrison T.M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types // *Earth. Planet. Sci. Lett.* 1983. V. 64. P. 295–304. DOI: 10.1016/0012-821X(83)90211-X
27. Miller C. F., McDowell S. M., Mapes R. W. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance // *Geological Society of America.* 2003. V. 31. No. 6. P. 529–532. DOI: 10.1130/0091-7613(2003)031<0529:HACGIO>2.0.CO;2
28. Boehnke P., Watson E. B., Trail D., Harrison T. M., Schmitt A. K. Zircon saturation re-revisited // *Chemical Geology.* 2013. V. 351. P. 324–334. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.05.028
29. Duan M., Niu Y., Sun P., Chen S., Kong J., Li J., Zhang Y., Hu Y., Shao F. A simple and robust method for calculating temperatures of granitoid magmas // *Mineralogy and Petrology.* 2021. V. 115, No. 6, in print. DOI: 10.1007/s00710-021-00769-5
30. Landenberger B., Collins W. J. Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: evidence from the Chaelundi Complex, Eastern Australia // *Journal of Petrology.* 1996. V. 37. P. 145–170. DOI: 10.1093/petrology/37.1.145
31. 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 Paleoproterozoic core of the Eastern Sarmatia, Kursk block: U–Pb, Lu–Hf and Sm–Nd isotope mapping and paleotectonic application // *Precambrian Research.* 2021 V. 353. 106021. DOI: 10.1016/j.precamres.2020.106021
32. Цыбуляев С. В., Савко К. А., Червяковская М. В. Палеопротерозойские андезитовые порфириды Курского блока Восточной Сарматии: геохимия и источники расплавов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2019. № 1. С. 26–38. DOI: 10.17308/geology.2019.1/1701
33. Terentiev R. A., Savko K. A., Santosh M. Paleoproterozoic evolution of the arc–back–arc system in the East Sarmatian Orogen (East European Craton): zircon SHRIMP geochronology and geochemistry of the Losevo volcanic suite // *American Journal of Science.* 2017. V. 317. P. 707–753. DOI: 10.2475/06.2017.03
34. Цыбуляев С. В., Савко К. А., Самсонов А. В., Кориш Е. Х. Палеопротерозойские рифтогенные вулканиты OIB- и MORB-типа Курского блока восточной Сарматии: петрология и геодинамика // *Петрология.* 2021. Т. 29. № 2. С. 136–171. DOI: 10.31857/S0869590321020060

Palaeoproterozoic I-type granodiorites of the Lunevsky massif, Kursk Block, Sarmatia: U-Pb age, isotopic systematics and sources of melt

© 2021 K. A. Savko¹✉, E. Kh. Korish¹, N. S. Bazikov¹, S. V. Tsybulyaev¹,
V. S. Chervyakovskiy², N. V. Kholina¹, I. Hussain¹

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

²*Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 15 Akademika Vonsovskogo str., 620016, Ekaterinburg, Russian Federation*

Abstract

Introduction: Recently age dating and isotope-geochemical data for the rocks of the Kursk Block allow for completely revision of the crustal growth history of Eastern Sarmatia in the Early Precambrian. However, there are very few data on the age, isotopic and elemental geochemistry of granodiorite-diorite massifs that are the most extensive manifestation of the Palaeoproterozoic magmatic event in the Kursk Block. This study contributes to the solution of this problem and is devoted to the Lunevsky massif of granodiorites. In the study, we focused on the Lunevsky granodiorite massif to contribute to the solution of the age crystallization and sources of melts on the basis of their geochemical study, U-Pb, Lu-Hf, and Sm-Nd isotope systematics.

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

Results and discussion: In terms of mineral composition and geochemical characteristics, the granodiorites of the Lunevsky massif belong to I-type granitoids and have adakite signatures. The crystallization age of the massif is 2040 Ma. It has a post-tectonic position.

Conclusion: The Hf isotopic composition in zircon indicates the participation of several sources in the formation of granodiorite melt, including crustal Paleoproterozoic and juvenile mantle Paleoproterozoic protoliths.

Keywords: Kursk Block, Paleoproterozoic, granodiorites, U-Pb isotopic age, melt sources, isotope systematics

Funding: LA-ICP-MS study was supported by the state assignment of the «Geoanalitik» shared research facilities of IGG UB RAS (№ AAAA-A18-118053090045-8). The re-equipment and comprehensive development of the «Geoanalitik» shared research facilities of the IGG UB RAS is financially supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2021-680).

For citation: Savko K. A., Korish E. Kh., Bazikov N. S., Tsybulyaev S. V., Chervyakovskiy V. S., Kholina N. V., Hussain I. Palaeoproterozoic I-type granodiorites of the Lunevsky massif, Kursk Block, Sarmatia: U-Pb age, isotopic systematics and sources of melt. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 4, pp. 4–23. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2021.4/3787>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

REFERENCES

1. 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. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2014, no. 2, pp. 56–78. (in Russ.).
2. Savko K. A., Samsonov A. V., Kholin V. M., Bazikov N. S. 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. 123–145. DOI: 10.1134/S0869593817020058
3. Korish E. Kh., Savko K. A., Samsonov A. V., Chervyakovskaya M.V. Paleoproterozoic diorites of the Trosnyansky Massif within the Kursk Block of Sarmatia: U-Pb age, isotope systematics and sources of melts. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2020, no. 1, pp. 87–99. DOI: 10.17308/geology.2020.1/2517 (in Russ.).
4. Tsybulyaev S. V., Savko K. A., Korish E. Kh., Chervyakovskaya M. V. Izotopno-geokhimicheskie osobennosti i geodinamicheskoe polozhenie porod shchekbinskogo kompleksa Kurskogo bloka vostochnoi Sarmatii [Isotopic-geochemical characteristics and geodynamical placement of the Schekbino complex rocks, Kursk Block, Eastern Sarmatia]. *Petrologiya i geodinamika geologicheskikh protsessov* [The petrology and geodynamics of the geological processes]. Irkutsk, September 6–13, 2021. V. 3. pp. 196–198. (in Russ.).
5. Al'bekov A. Yu., Ryborak M. V., Boiko P. S. Repernoie U-Pb izotopnoe datirovanie paleoproterozoiskikh gabbroidnykh formatsii Kurskogo bloka Sarmatii (Voronezhskii Kristallicheskii Massiv) [Benchmark isotopic dating of the palaeoproterozoic gabbroid formations of the Kursk Block, Sarmatia (Voronezh Crystalline Massif)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2012, no. 2, pp. 84–94. (in Russ.).
6. Tsybulyaev S. V., Savko K. A. Geochemical typization of the paleoproterozoic volcanics bimodal series of the Kurbakinskoy suite, Kursk Block, Eastern Sarmatia. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2017, no. 1, pp. 61–75. (in Russ.).
7. Tsybulyaev S. V., Savko K. A. U-Pb isotope age and tectonic position of the Paleoproterozoic andesite porphyrites, Kursk Block, Eastern Sarmatia. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology* 2018, no. 3, pp. 29–35. DOI: 10.17308/geology.2018.3/1559 (in Russ.).
8. Bogdanova S., Gorbatshev R., Grad M., Guterch A., Janik T., Kozlovskaya E., Motuza G., Skridlaite G., Starostenko V., Taran L. EUROBRIDGE: new insight into the geodynamic evolution of the East European Craton. *European Lithosphere Dynamics. Eds.: Gee, D.G., Stephenson, R.A. Geol. Soc. London Mem.*, 2006, vol. 32, pp. 599–628. DOI: 10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.36
9. 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. Geol. Soc. London Mem.*, 2004, vol. 30, pp. 69–74. DOI: 10.1144/GSL.MEM.2004.030.01.07
10. 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
11. 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
12. Ludwig K. SQUID 2: A User's Manual, rev. 12 Apr, 2009. Berkley Geochron. Ctr. Spec. Pub. 5. 2009. 110 p.
13. Jackson S. E., Norman J. P., William L. G., Belousova E. A. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chem. Geol.*, 2004, vol. 211, pp. 47–69. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.017
14. Giovanardi T., Lugli F. The Hf-INATOR: a free data reduction spreadsheet for Lu/Hf isotope analysis. *Earth Sci. Informat.*, 2017, vol. 10. DOI: 10.1007/s12145-017-0303-9
15. Whitney D. L., Evans B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Am. Mineral.*, 2010, vol. 95, pp. 185–187. DOI: 10.2138/am.2010.3371
16. Frost B. R., Barnes C. G., Collins W. J., Arculus R. J., Ellis D. J., Frost C. D. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 2001, vol. 42, pp. 2033–2048. DOI: 10.1093/petrology/42.11.2033
17. Cox K. G., Bell J. D., Pankhurst R.J. The interpretation of igneous rocks. London, Chapman & Hall, 1979. 450 p. DOI: 10.1007/978-94-017-3373-1
18. Middlemost E. A. K. Naming minerals in the magma/igneous rock system. *Earth Science Review*, 1994, vol. 37, pp. 215–224. DOI: 10.1016/0012-8252(94)90029-9
19. Boynton W. V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *Rare earth element geochemistry. Ed. P. Henderson. Amsterdam, Elsevier*, 1984. pp. 63–114. DOI: 10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3
20. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: Implication for mantle composition and processes. *Magmatism in Ocean Basins. Eds.: Saunders, A.D., Norry, M.J. London, Geological Society, Special Publications*, vol. 42. pp. 313–345. DOI: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
21. 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
22. Liu X., Liu W., Si C. Petrogenesis and source rocks of the high-K calc-alkaline and shoshonitic I-type granitoids in the northwestern part of East Junggar, NWChina. *Lithos*, 2019, vol. 326–327, pp. 298–312. DOI: 10.1016/j.lithos.2018.12.033
23. Whalen J. B., Currie K. L., Chappell B. W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1987, vol. 95, pp. 407–419. DOI: 10.1007/BF00402202
24. Defant M. J., Drummond M. S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 1990, vol. 347, no. 4, pp. 662–665. DOI: 10.1038/347662a0
25. Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 1999, vol. 46, pp. 411–429. DOI: 10.1016/S0024-4937(98)00076-0
26. Watson E. B., Harrison T. M. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 1983, vol. 64, pp. 295–304. DOI: 10.1016/0012-821X(83)90211-X
27. Miller C. F., McDowell S. M., Mapes R. W. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geological Society of America*, 2003,

vol. 31, no. 6, pp. 529–532. DOI: 10.1130/0091-7613(2003)031<0529:HACGIO>2.0.CO;2

28. Boehnke P., Watson E. B., Trail D., Harrison T. M., Schmitt A. K. Zircon saturation re-revisited. *Chemical Geology*, 2013, vol. 351, pp. 324–334. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.05.028

29. Duan M., Niu Y., Sun P., Chen S., Kong J., Li J., Zhang Y., Hu Y., Shao F. A simple and robust method for calculating temperatures of granitoid magmas. *Mineralogy and Petrology*, 2021, vol. 115, no. 6, in print. DOI: 10.1007/s00710-021-00769-5

30. Landenberger B., Collins W.J. Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: evidence from the Chaelundi Complex, Eastern Australia. *Journal of Petrology*, 1996, vol. 37, pp. 145–170. DOI: 10.1093/ptrology/37.1.145

31. 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 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, 106021. DOI: 10.1016/j.precamres.2020.106021

32. Tsybulyaev S. V., Savko K. A., Chervyakovskaya M. V. Paleoproterozoic andesite porphyrites, Kursk Block, Eastern Sarmatia: geochemistry and sources of melts. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2019, no. 1, pp. 26–38. DOI: 10.17308/geology.2019.1/1701 (in Russ.).

33. Terentiev R. A., Savko K. A., Santosh M. Paleoproterozoic evolution of the arc–back-arc system in the East Sarmatian Orogen (East European Craton): zircon SHRIMP geochronology and geochemistry of the Losevo volcanic suite. *American Journal of Science*, 2017, vol. 317, pp. 707–753. DOI: 10.2475/06.2017.03

34. Tsybulyaev S. V., Savko K. A., Samsonov A. V., Korish E. Kh. Paleoproterozoic OIB- and MORB-Type Rift Volcanics of the Kursk Block, Eastern Sarmatia: Petrology and Geodynamics. *Petrology*, 2021, vol. 29, no. 2, pp. 114–147. DOI: 10.1134/S0869591121020065

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>

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

Базиков Николай Сергеевич – к.г.-м.н., доцент кафедры полезных ископаемых и недропользования, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: nickolass@yandex.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0847-6498>

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

Червяковский Василий Станиславович – заведующий группой пробподготовки, Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого, Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: v.chervyakovskiy@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0400-6819>

Холина Наталья Викторовна – старший преподаватель кафедры полезных ископаемых и недропользования, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: holina_geol@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7220-4358>

Хуссейн Исрар – магистрант кафедры полезных ископаемых и недропользования, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: israrmazher@gmail.com;

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Konstantin A. Savko – Dr. habil. in Geol.-Min., 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 <https://orcid.org/0000-0002-7291-7024>

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>

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 <https://orcid.org/0000-0002-0847-6498>

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>

Vasily S. Chervyakovskiy – head of the sample preparation group, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: v.chervyakovskiy@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0400-6819>

Natalya V. Kholina – senior lecturer, Department of Mineral Resources and Mineral Management Studies, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: holina_geol@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7220-4358>

Israr Hussian – post graduate student, Department of Mineral Resources and Mineral Management Studies, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: israrmazher@gmail.com;

All authors have read and approved the final manuscript.