

## **Первая находка палеопротерозойских высокофракционированных гранитов на юге Воронцовского террейна Волго-Донского орогена**

©2025 Д. А. Гончаров<sup>1, 2</sup>✉, К. А. Савко<sup>3, 4</sup>, Р. А. Терентьев<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Ленинские горы, д. 1, 119990, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт физики земли им. О. Ю. Шмидта РАН,  
ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, 123242, Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
Старомонетный пер., 35, 119017, Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup>Воронежский государственный университет,  
Университетская пл., 1, 394018, Воронеж, Российская Федерация

### **Аннотация**

**Введение:** граниты составляют значительную часть континентальной коры и включают в себе информацию о геодинамических режимах верхней части литосферы. По своим характеристикам они подразделяются на не фракционированные, обычно рассматриваемые в терминах алфавитной классификации, и фракционированные – образующиеся из магм, претерпевших процессы значительной фракционной кристаллизации. Такие магмы обычно высокотемпературные и флюидонасыщенные, что выражается в отсутствии мафических минералов и присутствии минералов редких земель. Они обогащены LILE, имеют низкие значения отношений Nb/Ta и Zr/Hf, отрицательные Eu\*-аномалии и тетрад-эффект в распределении REE. Статья посвящена минералогии, геохимии и петрогенезису нового типа сильно фракционированных гранитов Воронцовского террейна.

**Методика:** химический состав проб определялся на рентгено-флуоресцентном спектрометре S8 Tiger (Bruker AXS GmbH, Германия) в Воронежском госуниверситете. Малые и редкие элементы определялись методом индукционно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием анализа (ICP-MS) в лаборатории физических и химических методов исследования минерального вещества Института геологии и геохимии УрО РАН. Локальные анализы минералов выполнены на растровом электронном микроскопе Jeol 6380LV с системой количественного энергодисперсионного анализа INCA 250 (ЦКПНО ВГУ) и на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira IV с энергодисперсионным (EDX) спектрометром X-Max 80 (ЦКП ИФЗ РАН).

**Результаты и обсуждение:** гранитоиды представляют собой массивные среднезернистые породы с гипидиоморфнозернистой и пойкилитовой структурой. По составу они сложены плагиоклазом (35–40 об. %), микроклином (до 30 об. %), кварцем (20–25 об. %), мусковитом (до 10 об. %) и биотитом (до 10 об. %). Для них характерны высокие содержания SiO<sub>2</sub> (71–75 мас. %) и щелочей (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O = 9–14.2 мас. %) с преобладанием калия над натрием (K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O = 1.1–5.6), низкие концентрации Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9.4–12.8 мас. %). Они обеднены сидерофильными, высокозарядными и литофильными элементами, за исключением Li (4–130 ppm) и Rb (120–140 ppm). В них отмечаются невысокие концентрации REE ( $\Sigma$ REE = 11–36 ppm), с умеренным обогащением LREE относительно HREE (La/Yb<sub>N</sub> = 2.87–13.48) и отрицательной Eu-аномалией (Eu/Eu\* = 0.4–0.56). Они являются



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

---

✉ Гончаров Денис Андреевич, e-mail: [geosci31@gmail.com](mailto:geosci31@gmail.com)

железистыми, перщелочными и метаглиноземистыми породами, что не позволяет отнести их ни к одному из типов алфавитной классификации, и позволяет предполагать их принадлежность к высокофракционированному типу. На это указывает присутствие флюорита и ксенотима, высокие концентрации Li и Rb, и невысокие отношения Nb/Ta и Zr/Hf. Составы изученных гранитов и гранитов S-типа Воронцовского террейна образуют единый тренд фракционной кристаллизации и позволяют предполагать, что фракционированию подвергались палеопротерозойские (2050–2070 млн лет) граниты S-типа. Температура кристаллизации биотита и насыщения расплава цирконием указывает на формирование расплавов в пределах средней коры. Формирование гранитов S-типа происходило в результате плавления незрелых метаосадков воронцовской серии в результате повышения теплового потока на фланге коллизионного орогена.

**Выводы:** в южной части Вороноцовского террейна впервые установлены перщелочные и метаглиноземистые железистые гранитоиды. Характер распределения петрогенных и малых элементов указывает на их принадлежность к высокофракционированному типу, тогда как петрографические характеристики и черты геохимического родства указывают, что фракционированию подвергались расплавы S-типа.

**Ключевые слова:** высокофракционированные граниты, палеопротерозой, Воронцовский террейн, Восточная Сарматия, редкоземельные элементы, REE, 2050–2070 млн лет, Волго-Донской ороген

**Источник финансирования:** исследование выполнено при поддержке госбюджетной темы ИГЕМ РАН № 124022400143-9.

**Для цитирования:** Гончаров Д. А., Савко К. А., Терентьев Р. А. Первая находка палеопротерозойских высокофракционированных гранитов на юге Воронцовского террейна Волго-Донского орогена // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2025. № 4. С. 45–58. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/4/45-58>

## Введение

Граниты являются самыми распространёнными горными породами в верхней континентальной коре и имеют большое значение, для понимания истории ее формирования [1–3]. В них заключена информация о составе, возрасте и геодинамических режимах верхней части литосферы.

Обычно граниты рассматриваются в терминах «алфавитной классификации» на основе их минералогии, геохимии и тектонических обстановок проявлений [2, 4]. Однако это возможно, только если они не подверглись значительной фракционной кристаллизации. По степени дифференциации, граниты подразделяются на: не фракционированные, фракционированные (слабо- и сильно фракционированные) и кумулятивные [5]. Высоко фракционированные граниты образуются из магм, претерпевших значительную фракционную кристаллизацию [5, 6]. Для таких магм характерны высокие температуры и насыщенность флюидами, что способствует процессам фракционной кристаллизации по сравнению с обычными, не фракционированными расплавами [5].

В минералогическом отношении для них характерно практически полное отсутствие мафических минералов и присутствие редкометальной минерализации вплоть до образования месторождений олова, тантала, тяжелых редких земель [7, 8]. В геохимическом отношении они являются высококремнистыми, перглиноземистыми калиевыми гранитами.

Фракционированные граниты обогащены литофильными элементами (LILE), значительно обеднены Ti, Eu, P, Sr и Ba [9, 10], и имеют низкие значения отношений Nb/Ta и Zr/Hf [11, 12]. Для них характерны выраженные отрицательные Eu\*-аномалии и тетра-

эффект в распределении REE [13].

В пределах Воронцовского террейна Волго-Донского орогена ранее были установлены гранитоиды A-, S- и I-типов, отвечающие последовательным стадиям его надсубдукционного развития [14, 15]. На юге Воронцовского террейна впервые встречены массивы гранитов, которые нельзя отнести к какому-либо типу алфавитной классификации. Для них характерны высокие содержания кремнезёма, лития и рубидия, наличие глубоких отрицательных европиевых аномалий и низкие значения отношений Zr/Hf, что сближает их с сильно фракционированными гранитами. Настоящая статья посвящена минералогии и геохимии нового типа сильно фракционированных гранитов Воронцовского террейна и их петрогенезису.

## Геологическое строение

Восточно-Европейский кратон состоит из трёх коровых сегментов: Фенноскандии (включая Балтийский щит), Сарматии (Украинский щит и Воронежский кристаллический массив) и Волго-Уралии (рис. 1а) [16, 17]. Волго-Донской ороген является гигантской палеопротерозойской субдукционно-коллизионной структурой между архейскими фрагментами Сарматского и Волго-Уральского кратонов (рис. 1б).

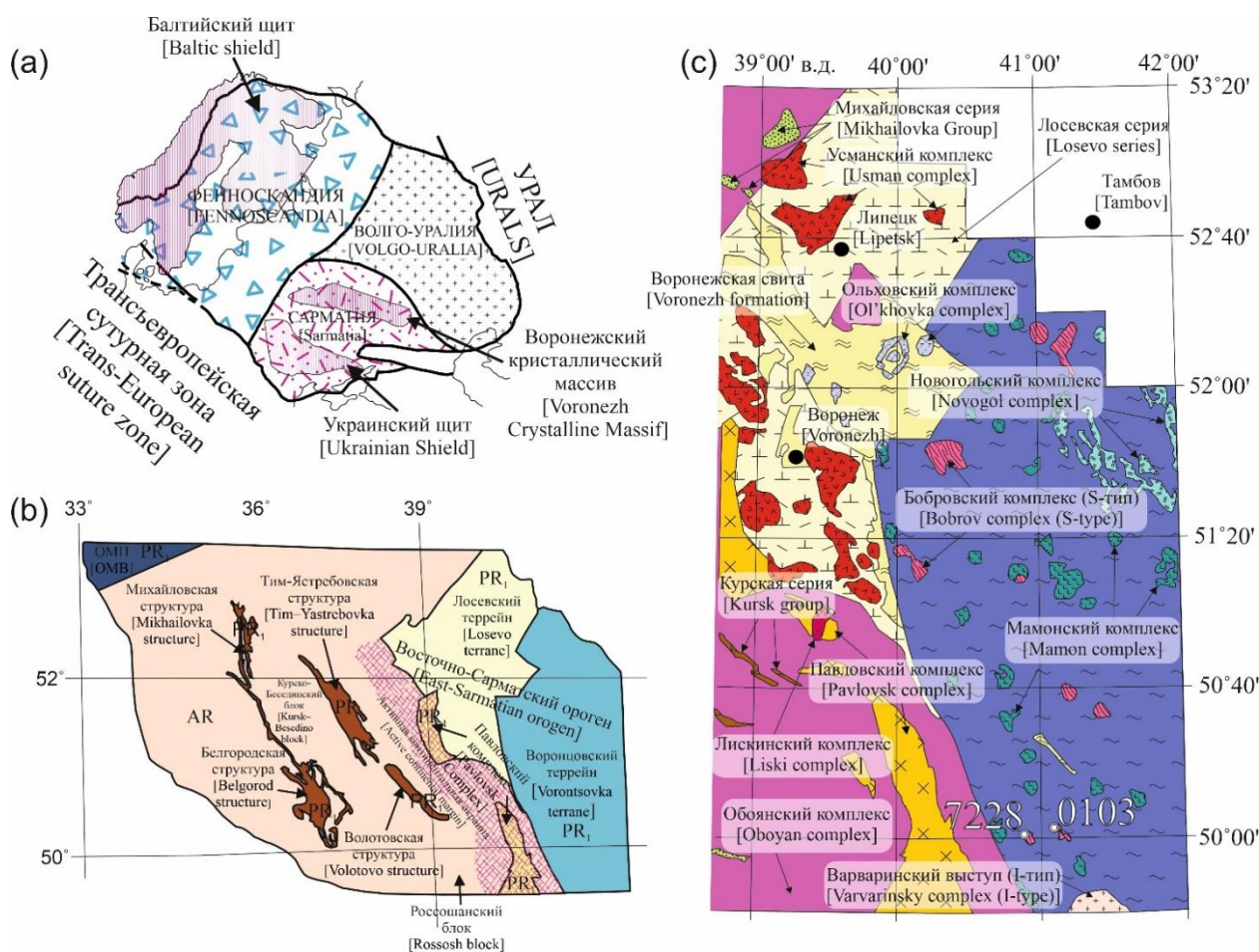
Воронцовский террейн в западной части Волго-Донского орогена сложен ювенильными палеопротерозойскими метаосадками воронцовской серии, представленными метаморфизованными песчаниково-сланцевыми флишоидными отложениями, накопление которых происходило в тектонически активной обстановке со слабым химическим выветриванием, а источниками служили породы различного состава – от основных до кислых [18–20]. Метаосадки имеют радио-

генный состав Nd и, в основном, палеопротерозойские модельные возрасты ( $T_{Nd(DM)} = 2100\text{--}2400$  млн лет). Они рассматриваются как аккреционная призма, сформировавшаяся при разрушении островодужных построек смежного Лосевского террейна [21] и/или островодужных построек самого Воронцовского террейна [15].

С запада Воронцовский террейн отделяется от Лосевского террейна – Лосевско-Мамонским разломом, тогда как с востока он ограничен Терсинским и Южно-Волжским поясами, каждый из которых имеет свою специфику строения, состава и степени метаморфической переработки [17].

Отложения воронцовской серии прорываются многочисленными интрузиями гранитов S- и A-типов с возрастом 2050–2070 млн лет [14, 19], недавно установленными на юге террейна интрузиями гранитов I-типа (2090 млн лет) [15], а также высокомагнезиальными диоритами, базитами и ультрабазитами [22].

Объектами настоящего исследования являются массивы гранитоидов, вскрытые скважинами 0103 и 7228 в пределах Артюховского участка, в южной части Воронцовского террейна (рис. 1с, 2). Кроме этого, для сопоставления нами привлечены данные по другим гранитоидам Воронцовского террейна (S-, I- и A-тип) [14, 15, 19].



**Рис. 1.** (а) Схема сегментов Восточно-Европейского кратона по [16]; (б) Схематическая карта Восточной Сарматии; (с) Схематическая геологическая карта Воронцовского террейна.

**[Fig. 1.]** (a) Diagram of the segments of the East European craton [16]; (b) Schematic map of the East Sarmatia; (c) Schematic geological map of the Vorontsovka terrain.]

#### Аналитические методы исследований

**Петрогенные оксиды.** 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 породо-образующих 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).

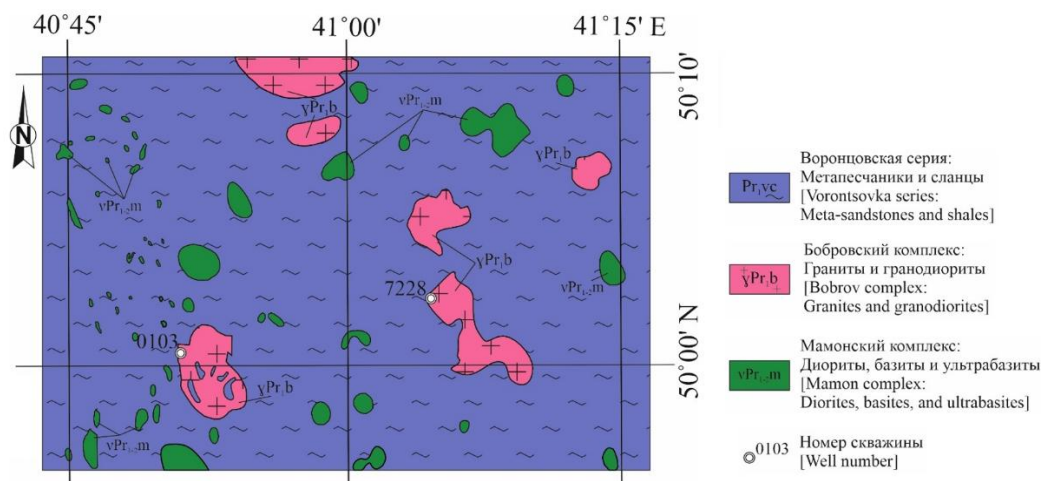


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Артюховского участка Воронцовского террейна.

[Fig. 2. Schematic geological map of the Artyukhovsky section of the Vorontsovska terrane.]

**Редкие и редкоземельные элементы.** Концентрации редких и рассеянных элементов определены методом индукционно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием анализа (ICPMS) в лаборатории физических и химических методов исследования минерального вещества Института геологии и геохимии УрО РАН. Аттестат признания компетентности испытательной лаборатории (центра) № РОСС RU.И750.НЖ01.21ИЛ38 от 22 июня 2023 г. Оборудование: масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой Nexion 300S фирмы Perkin Elmer. Пределы обнаружения элементов составили от 0.02–3 ppm для тяжелых и средних по массе элементов (Hf, Ta, U, Th, PЗЭ и др.) до 20–50 ppm для легких элементов (Ba, Rb, Sr и др.).

**Микрозондовые анализы.** Локальные анализы минералов выполнены на растровом электронном микроскопе Jeol 6380LV с системой количественного энергодисперсионного анализа INCA 250 (ЦКПНО ВГУ). Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1.2 мА, время набора спектра 70 сек, диаметр пучка 1–3 мкм. Помимо того, для контроля воспроизводимости данных был выполнен повторный анализ в тех же образцах на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira IV с энергодисперсионным (EDX) спектрометром X-Max 80 (ЦКП ИФЗ РАН). Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1 мА, время набора спектра 90 сек, диаметр пучка 1–3 мкм. ZAF коррекция при расчете содержания окислов и оценка точности проводились с помощью комплекта программ математического обеспечения системы. Точность анализа систематически контролировалась по эталонным образцам природных и синтетических минералов.

Обработка геохимических данных проводилась с помощью программы GCDkit [23], обработка локальных микрозондовых анализов минералов выполнялась в программе GCDkit.Mineral [24].

### Петрография и минералогия

Граниты представляют собой массивные среднезернистые розовато-серые породы с гипидиоморф-

нозернистой и пойкиллитовой (включения кварца, мусковита и биотита в плагиоклазе) структурой (рис. 3 а-е). Они сложены плагиоклазом, КПШ, кварцем, биотитом, мусковитом (рис. 3 b-d). Акцессорные минералы представлены цирконом, монацитом, флюоритом, ксенотимом, баритом, титанитом и апатитом, рудные – ильменитом, пиритом, галенитом, сфалеритом, арсенопиритом, рутилом, халькопиритом, магнетитом, вторичный минерал представлен хлоритом. Рудные минералы имеют преимущественно наложенный характер и находятся в тесной ассоциации с хлоритом. Ильменит развивается по спайности в биотите.

**Плагиоклаз** представлен таблитчатыми и/или удлиненно-призматическими кристаллами, размером 0.25–1 мм в количестве 35–40 об. %, и по составу отвечает альбиту и олигоклазу ( $An_{4-24}$ ). Плагиоклаз часто сосюритизирован и серицитизирован (рис. 3d).

**Микроклин** образует решётчатые кристаллы размером до 1.5 мм, в количестве до 30 об. % и характеризуется небольшой примесью альбитового компонента ( $Ab_{3-10}$ ).

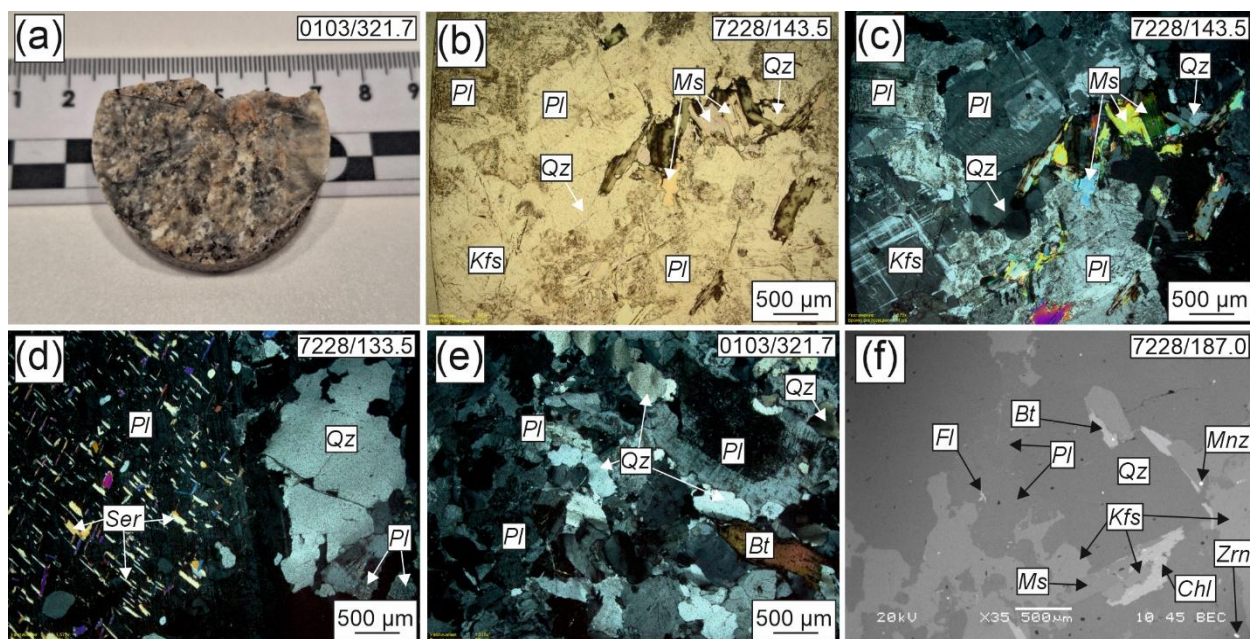
**Биотит** присутствует в виде коричневатобурых лейст, размером 0.1–1 мм в количестве до 10 об. %. По составу биотит железистый ( $X_{Fe}=0.79-0.67$ ), глинозёмистый ( $Al_2O_3=14.9-19.5$  мас. %) с высокой титаносодержимостью ( $TiO_2=2.3-3.7$  мас. %).

**Мусковит** представлен чешуйками размером от 0.1 до 1.5 мм, в количестве не более 10 об. %. Также в породах отмечается вторичный мелкочешуйчатый (0.1 до 0.3 мм) мусковит, развивающийся по плагиоклазу (Рис. 3d).

**Кварц** присутствует в виде изометричных и ксеноморфных зёрен, размером 0.1–1.2 мм, в количестве 20–25 об. %.

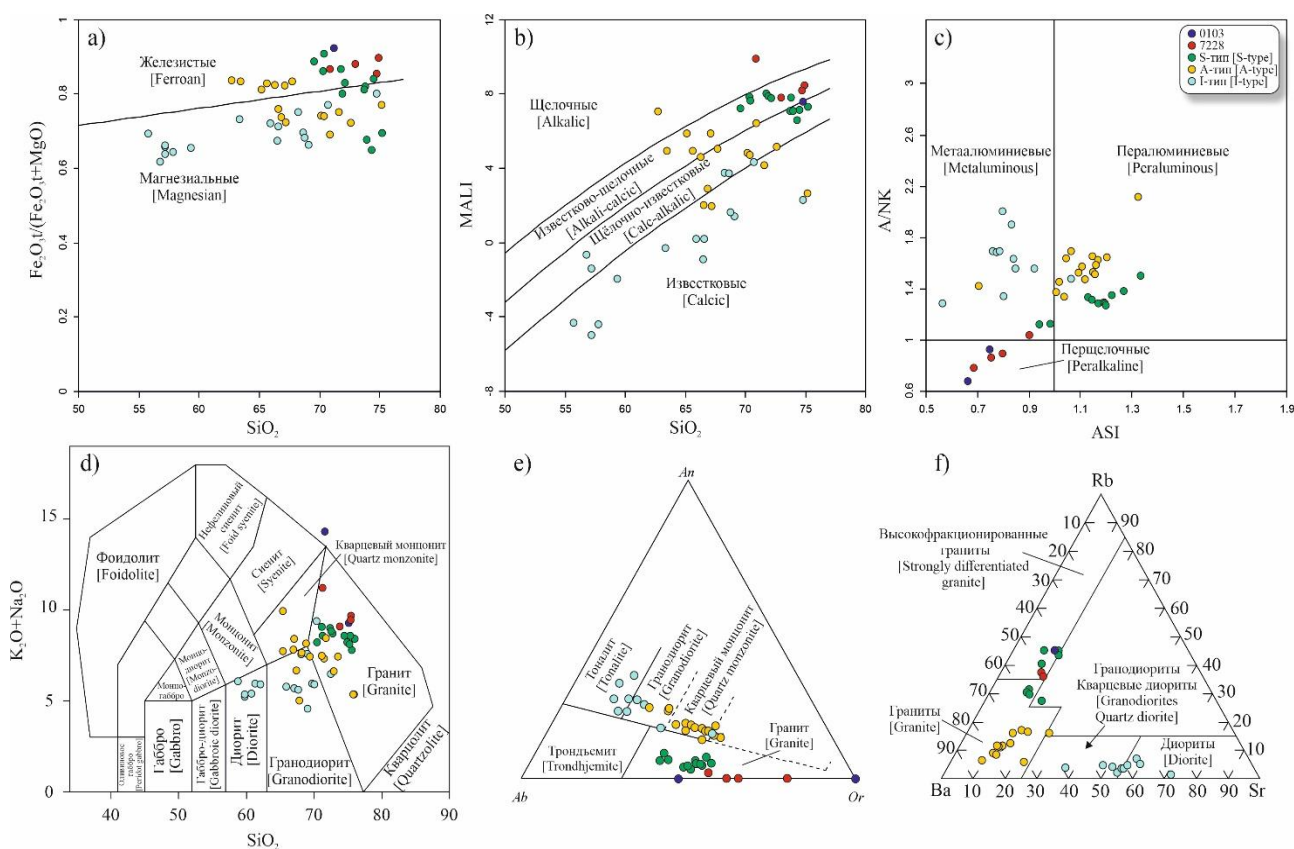
**Хлорит** развивается по биотиту и представлен лейстами буро-зелёного цвета, размером до 0.7 мм. По составу он железистый ( $X_{Fe}=0.67-0.79$ ) и глинозёмистый ( $Al_2O_3=20-21$  мас. %).





**Рис. 3.** Фото образца гранита (0103/321.7) (a), шлифов гранитов (b–e), и снимок в отраженных электронах (f), где: *Pl* – плагиоклаз, *Kfs* – КФШ, *Qz* – кварц, *Bt* – биотит, *Ms* – мусковит, *Ser* – серицит, *Fl* – флюорит, *Zrn* – циркон, *Mnz* – монацит, *Chl* – хлорит.

[Fig. 3. A photo of a granite sample (0103/321.7) (a), granite thin sections (b–e), and BSE image (f), where: *Pl* – plagioclase, *Kfs* – K-feldspar, *Qz* – quartz, *Bt* – biotite, *Ms* – muscovite, *Ser* – sericite, *Fl* – fluorite, *Zrn* – zircon, *Mnz* – monazite, *Chl* – chlorite.]



**Рис. 4.** Составы изученных гранитов и гранитов S- и A-типа [14]; I-типа [15]; на диаграммах (a)  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}/(\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}+\text{MgO})$  [25]; (b)  $\text{MALI} - \text{SiO}_2$  [25]; (c)  $\text{A/NK} - \text{ASI}$  [25]; (d)  $\text{TAS}$  [26]; (e)  $\text{Ab-An-Or}$  [27]; (f)  $\text{Ba-Rb-Sr}$  [28].

[Fig. 4. Compositions of the studied granites and S- and A-type granites [14]; I-type granites [15]; diagrams (a)  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}/(\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}+\text{MgO})$ ; (b)  $\text{MALI} - \text{SiO}_2$  [25]; (c)  $\text{A/NK} - \text{ASI}$  [25]; (d)  $\text{TAS}$  [26]; (e)  $\text{Ab-An-Or}$  [27]; (f)  $\text{Ba-Rb-Sr}$  [28].]

### Геохимия

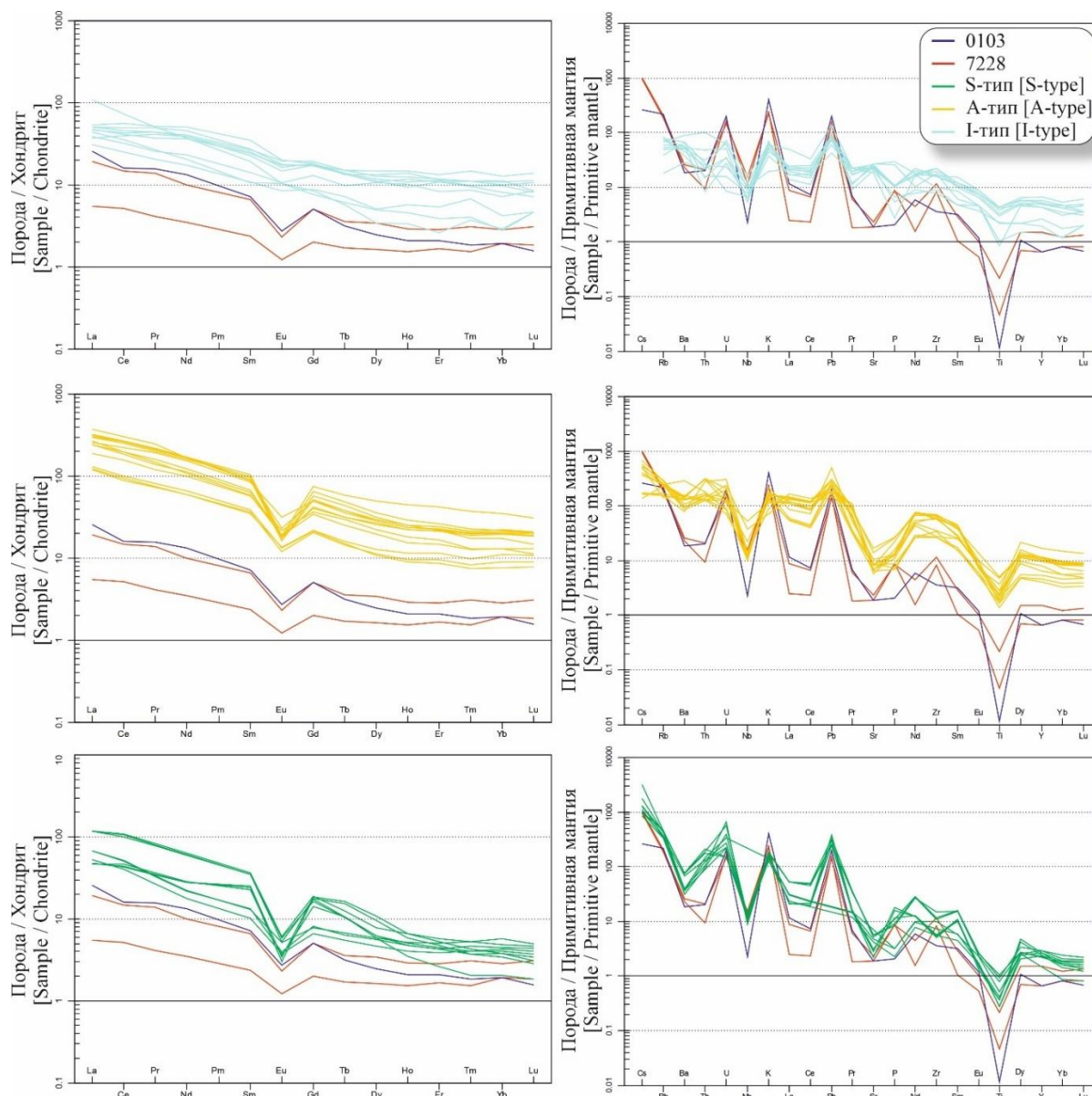
Для гранитоидов характерны высокие содержания  $\text{SiO}_2$  от 71 до 75 мас. % и щелочей ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 9\text{--}14.2$  мас. %) при резком преобладании калия ( $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1.1\text{--}5.6$ ), низкие концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$  от 9.4 до 12.8 мас. %. Они являются перщелочными и метаглиноземистыми ( $\text{A}/\text{CNK} = 0.41\text{--}0.87$ ) (рис. 4 а–с). Граниты имеют высокую железистость ( $\text{Fe}^* = 0.87\text{--}0.93$ ) и низкие концентрации магния ( $\text{MgO} = 0.17\text{--}0.43$  мас. %). Фигуративные точки составов попадают в поля гранодиоритов и гранитов на классификационных диаграммах (рис. 4d, e), а также высокофракционированных гранитов (рис. 4f).

Граниты отличаются низкими содержаниями большинства редких элементов, в том числе сидерофиль-

ных (Cr, Co, Ni, Sc, V, Cu), высокочargedных (HFSE – Th, Nb, Zr, U), литофильных (Ba, Sr, Cs, Be) за исключением Li (4–130 ppm) и Rb (120–140 ppm).

В гранитах наблюдаются невысокие концентрации редкоземельных ( $\sum \text{REE} = 11\text{--}36$  ppm, среднее 26), с умеренным обогащением LREE относительно HREE ( $\text{La}/\text{Yb}_N = 2.87\text{--}13.48$ ) и отрицательной Eu-аномалией ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.4\text{--}0.56$ ) (рис. 5). В распределении редких элементах отмечаются отрицательные аномалии Ba, Th, Nb, La, Ce и Ti (рис. 5).

С ростом  $\text{SiO}_2$  происходит уменьшение содержаний  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{K}_2\text{O}$ , и увеличение  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  (рис. 6). Отмечается уменьшение содержания Sr, Y, Zr и Nb с ростом  $\text{SiO}_2$  и увеличение Rb и Pb.



**Рис. 5.** Нормализованное к хондриту [29] (Boynnton, 1984) распределение редкоземельных элементов в изученных гранитах, гранитах S- и A-типа [14], I-типа [15]; Нормализованное к примитивной мантии [30] распределение редких элементов в изученных гранитах, гранитах S- и A-типа [14], I-типа [15].

[Fig. 5. The distribution of rare earth elements normalized to chondrite (Boynnton, 1984) in the studied granites, S- and A-type granites [14], and I-type granites [15]; the distribution of small and rare elements in the studied granites normalized to primitive mantle [30], S- and A-type granites [14], and I-type granites [15].]



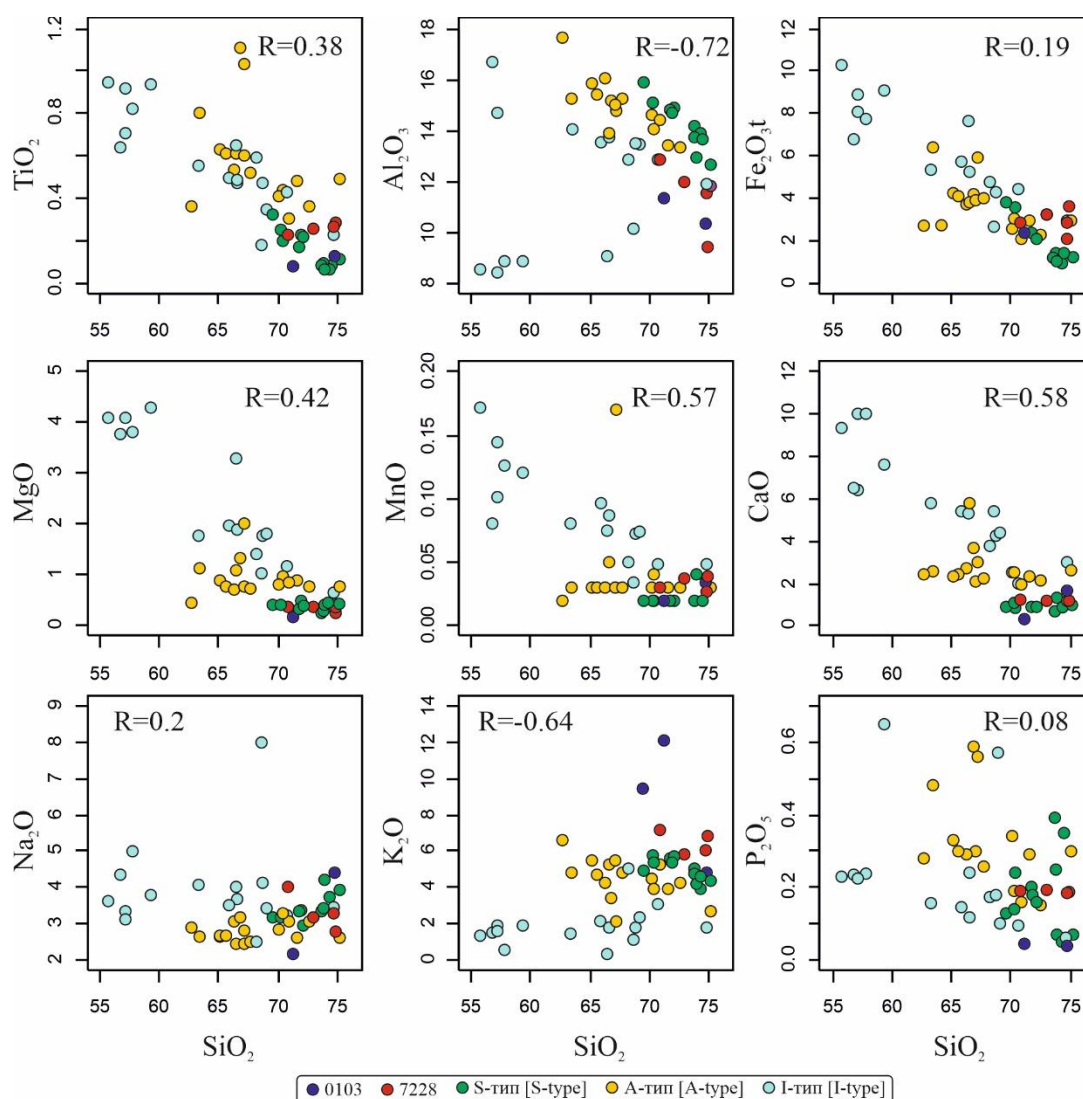
## Обсуждение результатов

## Геохимическая типизация

Из классификаций гранитоидов в настоящее время наиболее распространённой является алфавитная, согласно которой граниты подразделяются на S-, I-, M- и A-типы [3, 4]. Существует несколько общих моделей образования гранитоидов, среди них: из базитового расплава в результате фракционной кристаллизации или частичного плавления (I-тип), в результате плавления метасадочных пород (S-тип) при различных термодинамических параметрах и тектонических обстановках, в результате выплавления из мантийного

субстрата в COX (M-тип) и формирующиеся из дегидратированной континентальной коры (A-тип) [31, 32].

По геохимическим признакам изученные граниты являются железистыми, перщелочными и метаглиноземистыми породами и их невозможно отнести ни к одному из типов алфавитной классификации на дискриминантных диаграммах [5, 25, 33–35]. От I-типа их отличает присутствие мусковита, высокая железистость и щелочность, отрицательные Eu-аномалии, от S-типа – низкая глиноземистость, от A-типа – низкие концентрации REE и HFSE, от M-типа – калиевый профиль щелочности и фракционированные спектры REE.

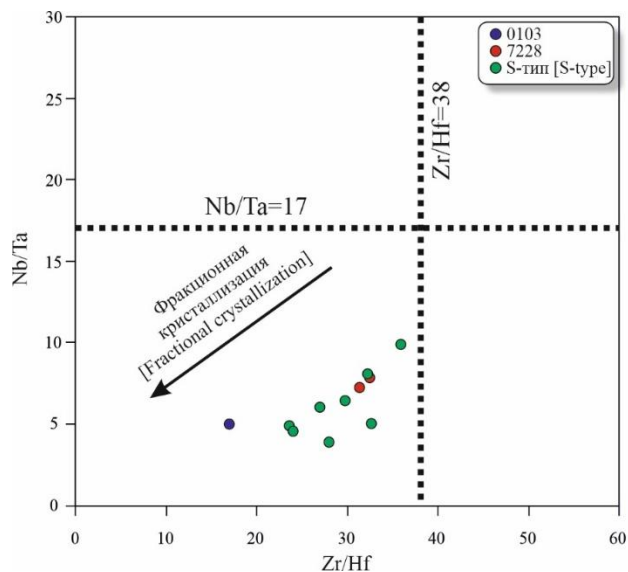


**Рис. 6.** Бинарные диаграммы для петрогенных оксидов для гранитов Воронцовского террейна: 0103 и 7228 – это исследование; S- и A-тип [14]; I-тип [15]; R- коэффициент корреляции для изученных гранитов.

[Fig. 6. Binary diagrams for petrogenetic oxides for granites of the Vorontsovka terrane: 0103 and 7228 are the study; S- and A-type [14]; I-type [15]; R- correlation coefficient for the studied granites.]

В нефракционированных магмах отношения Nb/Ta, Zr/Hf, Y/Ho остаются почти постоянными из-за их геохимически идентичного поведения. Поэтому отношения Nb/Ta и Zr/Hf могут служить индикаторами степени фракционирования расплавов [12, 36]. По

отношению Zr/Hf граниты классифицируются как нефракционированные ( $Zr/Hf > 55$ ), фракционированные ( $25 < Zr/Hf < 55$ ) и сильно фракционированные ( $Zr/Hf < 25$ ) [37]. Значение отношения  $Zr/Hf=26$  предположительно считается граничным между магматическими и



**Рис. 7.** Диаграмма Nb/Ta-Zr/Hf [5] для гранитов 0103 и 7228 (это исследование) и S-типа [14].

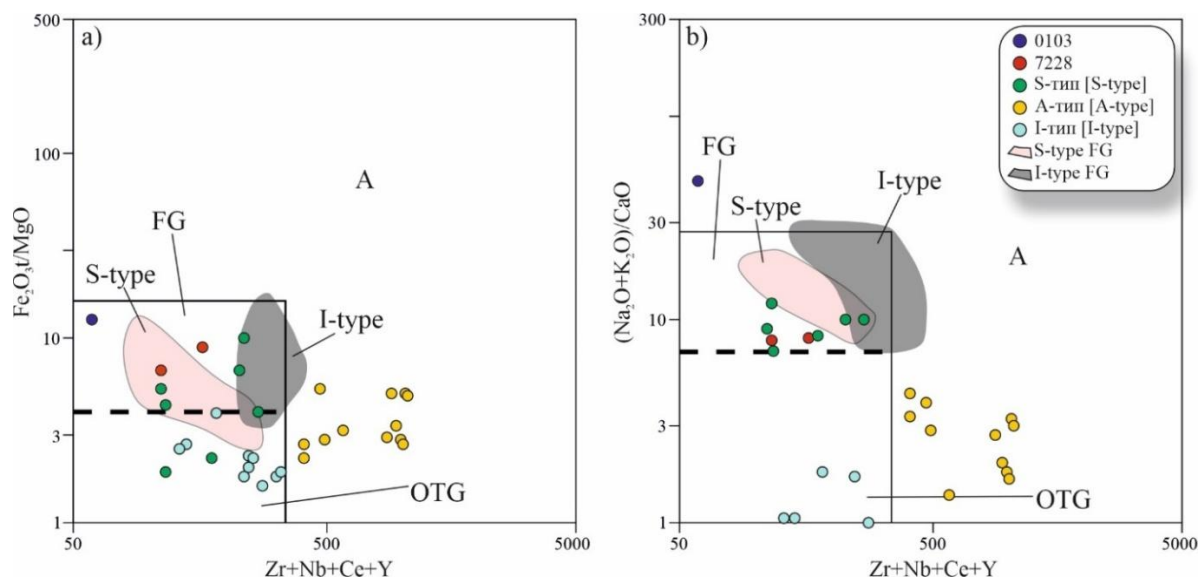
[Fig. 7. The Nb/Ta-Zr/Hf diagram [5] for granites 0103 and 7228 (this study) and S-type [14].]

гидротермальными гранитными системами [38]. Zr/Hf отношение уменьшается со снижением содержания Zr, что указывает на интенсивную фракционную кристаллизацию при уменьшении температуры в сильно фракционированных кислых расплавах (рис. 7) [5]. Также концентрации REE постепенно уменьшаются в сильно

фракционированных гранитах, тогда как значения соотношений легких и тяжелых РЗЭ имеет тенденцию к снижению при все более глубоких отрицательных аномалиях Eu\* [39–41]. При фракционировании гранитных магм снижается концентрация Cr, Sr, Zr и других редких элементов, но увеличивается Li, Rb. Так в работе [31] были предложены диаграммы, позволяющие отличить сильно фракционированные граниты I- и S-типа от A-типа, используя несовместимые элементы Zr, Nb, Ce и Y в качестве дискриминатора [42]. Точки составов изученных гранитов в основном попадают в поле фракционированных гранитов (рис. 8).

На принадлежность изученных гранитов к высоко фракционированным гранитам указывают и петрографические характеристики, среди которых: присутствие микроклина, и наличие таких акцессорных минералов, как: флюорит и ксенотим, что указывает на высокую насыщенность остаточного расплава фтором и HREE [43].

Необходимо отметить, что высокие концентрации Li (65–135 ppm) и Rb (213–290 ppm) и низкие отношения Zr/Hf (24–36) (рис. 7) также характерны и для некоторых высокоглиноземистых S-гранитов Воронцовского террейна [14], часть точек составов которых также попадает в поле высоко фракционированных гранитов (рис. 4б). Составы гранитов S-типа и фракционированных гранитов Воронцовского террейна образуют единый тренд фракционной кристаллизации. Таким образом, фракционированию в магматической камере, вероятнее всего, подвергались гранитные расплавы S-типа.



**Рис. 8.** Составы изученных гранитов (0103 и 7228); гранитов S- и A-типа [14]; гранитов I-типа [15]; S-type FG и I-type FG - поля фракционированных гранитов S- и I-типа соответственно [31] на диаграммах (a) Zr+Nb+Ce+Y – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgO [31]; (b) Zr+Nb+Ce+Y – (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/CaO [31].

[Fig. 8. The compositions of the studied granites (0103 and 7228); S- and A-type granites [14]; I-type granites [15]; S-type FG and I-type FG are fields of fractionated S- and I-type granites, respectively [31] in diagrams (a) Zr+Nb+Ce+Y – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgO [31]; (b) Zr+Nb+Ce+Y – (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)/CaO [31].]

Температура кристаллизации

Температура насыщения расплава цирконием по [44] составила 648–750°C, тогда как температура

кристаллизации биотита [45] составила 732–896°C (среднее 755°C), давление 5.1–8.7 кбар (среднее 6.3 кбар), что предполагает формирование очагов



плавления на уровне средней коры. Низкие температуры кристаллизации по насыщению расплава цирконием объясняются уменьшением его содержаний при фракционировании.

#### Петрогенезис

При фракционировании расплавов происходит обильная кристаллизация минералов-концентратов HFSE и HREE, что приводит к значительным изменениям редкоземельного состава гранитоидов и затрудняет использование редких земель в целях восстановления источников расплавов [5]. Помимо этого, и в распределении петрогенных оксидов наблюдаются признаки фракционирования, выраженные в низких концентрациях  $Al_2O_3$  (9.4–12.8

мас. %), связанных с фракционированием плагиоклаза, на которое указывает присутствие в изученных образцах отрицательных  $Eu^*$ -аномалий ( $Eu/Eu^*=0.40–0.88$ ) (табл. 1). Схожие геохимические характеристики демонстрируют и граниты S-типа Воронцовского террейна, для которых характерны отрицательные  $Eu^*$ -аномалии, а в высокофракционированных разностях также пониженные концентрации  $Al_2O_3$  [14], что в совокупности с трендами на диаграмме Nb/Ta – Zr/Hf (рис. 7) позволяет предполагать, что граниты в южной части Воронцовского террейна являются продуктом фракционирования расплавов S-типа. Это свидетельствует о близком возрасте гранитов S типа (2050–2070 млн лет) и их фракционированных разностей.

**Табл. 1.** Содержания петрогенных оксидов, редких и редкоземельных элементов  
[Table 1. Content of major oxides, rare and rare-earth elements]

| Компоненты<br>[Component]          | 7228/133.5 | 7228/143.5 | 7228/173.5 | 7228/187 | 0103/321.7(2) | 0103/321.7(1) |
|------------------------------------|------------|------------|------------|----------|---------------|---------------|
| 1                                  | 2          | 3          | 4          | 5        | 6             | 7             |
| SiO <sub>2</sub>                   | 72.973     | 74.888     | 74.697     | 70.847   | 74.758        | 71.222        |
| TiO <sub>2</sub>                   | 0.259      | 0.284      | 0.266      | 0.226    | 0.125         | 0.071         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 11.938     | 9.379      | 10.32      | 12.823   | 11.53         | 11.302        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub>    | 3.22       | 3.614      | 2.868      | 2.836    | 2.042         | 2.34          |
| MgO                                | 0.389      | 0.375      | 0.432      | 0.387    | 0.311         | 0.17          |
| MnO                                | 0.037      | 0.039      | 0.034      | 0.029    | 0.027         | 0.02          |
| CaO                                | 1.196      | 1.17       | 1.185      | 1.232    | 1.664         | 0.286         |
| Na <sub>2</sub> O                  | 3.164      | 2.798      | 3.289      | 3.998    | 4.396         | 2.155         |
| K <sub>2</sub> O                   | 5.824      | 6.827      | 6.074      | 7.137    | 4.846         | 12.089        |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>      | 0.194      | 0.188      | 0.186      | 0.19     | 0.041         | 0.045         |
| П.п.п.<br>[LOI]                    | 0.714      | 0.351      | 0.528      | 0.217    | 0.201         | 0.254         |
| Сумма<br>[Total]                   | 99.94      | 99.928     | 99.939     | 99.95    | 99.957        | 99.97         |
| K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O | 1.84       | 2.44       | 1.85       | 1.79     | 1.10          | 5.61          |
| K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O | 8.99       | 9.63       | 9.36       | 11.14    | 9.24          | 14.24         |
| A/CNK                              | 0.87       | 0.66       | 0.73       | 0.78     | 0.74          | 0.66          |
| Li                                 |            | 100        |            | 130      |               | 4             |
| Be                                 |            | 1.9        |            | 1.9      |               | 0.5           |
| Sc                                 |            | 0.34       |            | 0.05     |               | <0.1          |
| V                                  |            | 7          |            | 1.9      |               | 1.3           |
| Cr                                 |            | 14         |            | 4.7      |               | 8             |
| Co                                 |            | 1.6        |            | 0.25     |               | 0.27          |
| Ni                                 |            | 40         |            | 1.2      |               | 1             |
| Cu                                 |            | 60         |            | 2.3      |               | 3.9           |
| Zn                                 |            | 23         |            | 11       |               | <0.006        |
| Ga                                 |            | 12         |            | 6        |               | 7             |
| Ge                                 |            | 1.1        |            | 0.8      |               | 0.9           |
| Rb                                 |            | 130        |            | 120      |               | 140           |
| Sr                                 |            | 50         |            | 40       |               | 40            |
| Y                                  |            | 7          |            | 3        |               | 3             |
| Zr                                 |            | 130        |            | 94       |               | 40.8          |
| Nb                                 |            | 11         |            | 8        |               | 1.6           |
| Mo                                 |            | 2.1        |            | 2.2      |               | 2.5           |
| Sb                                 |            | 0.08       |            | 0.09     |               | 0.19          |
| Cs                                 |            | 8          |            | 7.7      |               | 2.1           |
| Ba                                 |            | 180        |            | 160      |               | 130           |
| La                                 |            | 6          |            | 1.7      |               | 8             |
| Ce                                 |            | 12         |            | 4.2      |               | 13            |
| Pr                                 |            | 1.7        |            | 0.5      |               | 1.9           |
| Nd                                 |            | 6          |            | 2.1      |               | 8             |
| Sm                                 |            | 1.3        |            | 0.46     |               | 1.4           |
| Eu                                 |            | 0.17       |            | 0.09     |               | 0.2           |

Продолжение табл. 1  
[Continued Table 1]

| 1                    | 2    | 3     | 4    | 5     | 6    | 7     |
|----------------------|------|-------|------|-------|------|-------|
| Gd                   |      | 1.3   |      | 0.52  |      | 1.3   |
| Tb                   |      | 0.17  |      | 0.08  |      | 0.15  |
| Dy                   |      | 1.1   |      | 0.52  |      | 0.8   |
| Ho                   |      | 0.21  |      | 0.11  |      | 0.15  |
| Er                   |      | 0.6   |      | 0.35  |      | 0.44  |
| Tm                   |      | 0.1   |      | 0.05  |      | 0.06  |
| Yb                   |      | 0.6   |      | 0.4   |      | 0.4   |
| Lu                   |      | 0.1   |      | 0.06  |      | 0.05  |
| Hf                   |      | 4     |      | 3     |      | 2.4   |
| Ta                   |      | 1.4   |      | 1.1   |      | 0.32  |
| Pb                   |      | 10    |      | 11    |      | 14    |
| Th                   |      | 1.8   |      | 0.8   |      | 1.7   |
| U                    |      | 3.1   |      | 3.5   |      | 4.2   |
| REE                  |      | 31.35 |      | 11.14 |      | 35.85 |
| (La/Yb) <sub>n</sub> |      | 6.74  |      | 2.87  |      | 13.48 |
| (Gd/Yb) <sub>n</sub> |      | 1.75  |      | 1.05  |      | 2.62  |
| Eu/Eu*               |      | 0.4   |      | 0.56  |      | 0.45  |
| Sr/Y                 |      | 7.14  |      | 13.33 |      | 13.33 |
| Zr/Hf                |      | 32.5  |      | 31.3  |      | 17    |
| Fe*                  | 0.89 | 0.91  | 0.87 | 0.88  | 0.87 | 0.93  |

Примечание:  $Fe^* = Fe_2O_3t/(Fe_2O_3t+MgO)$ . n – Нормализация к хондриту [29].

[Note:  $Fe^* = Fe_2O_3t/(Fe_2O_3t+MgO)$ . n - Chondrite normalization [29].]

Метаосадки воронцовской серии и граниты S-типа имеют близкие Sm-Nd изотопно-геохимических характеристики, U-Pb возрасты ядер цирконов в гранитах и детритовых цирконов из вмещающих метаосадков. Эти данные однозначно свидетельствуют об образовании S-гранитов при частичном плавлении метаосадков воронцовской серии [14].

Предполагается, что гранитоидный магматизм S-типа в Воронцовском террейне связан с повышением теплового потока и утолщением палеопротерозойской коры на фланге коллизионного орогена, в результате чего плавлению подвергались ювенильные палеопротерозойские незрелые низкоглинозёмистые осадки Воронцовского террейна - метапесчаники и сланцы [14].

### Выводы

В южной части Вороноцовского террейна установлены перщелочные и метаглинозёмистые железистые гранитоиды с высокими концентрациями  $SiO_2$  и  $K_2O+Na_2O$  и низкими концентрациями  $Al_2O_3$ . Они обогащены Li и Rb, обеднены Zr, Ga и Sr, имеют низкие значения отношений Nb/Ta и Zr/Hf и линейное распределение компонентов на бинарных диаграммах вместе с S-гранитами. В них присутствуют акцессорные флюорит и ксенотим, предполагая обогащение магм фтором и HREE. Эти данные позволяют сделать вывод, что граниты в южной части Воронцовского террейна образовались в результате фракционной кристаллизации расплавов S-типа.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Hawkesworth C. J., Kemp A. I. S. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution // *Chemical Geology*. 2006. Vol. 226. P. 0–162

2. Bonin B. A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects // *Lithos*. 2007. Vol. 97. P. 1–29

3. Brown M. Granite: From genesis to emplacement // *Geological Society of America Bulletin*. 2012. Vol. 125 P. 1079–1113

4. Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments // *Lithos*. 1999. Vol. 46. P. 605–626

5. Wu F., Liu X., Ji W. Wang J., Yang L. Highly fractionated granites: Recognition and research // *Sci. China Earth Sci*. 2017. Vol. 60. P. 1201–1219

6. Gao P., Zheng Y., Zhao Z. Experimental melts from crustal rocks: A lithochemical constraint on granite petrogenesis // *Lithos*. 2016. Vol. 266–267. P. 133–157

7. Wu F., Liu X., Liu Z., Wang R., Xie L., Wang J., Ji W., Yang L., Liu C., Khanal G., He S. Highly fractionated Himalayan leucogranites and associated rare-metal mineralization // *Lithos*. 2020. Vol. 105319. P. 352–353

8. Wang R., Wu, F., Xie L., Liu X., Wang J., Yang L., Lai W., Liu C. A preliminary study of rare-metal mineralization in the Himalayan leucogranite belts, South Tibet // *Sci. China Earth Sci*. 2017. Vol. 60. P. 1655–1663

9. Lee C. A., Morton D. M. High silica granites: Terminal porosity and crystal settling in shallow magma chambers // *Earth Planet. Sci. Lett*. 2015 Vol. 409. P. 23–31

10. Chen J. Y., Yang J. H., Zhang J. H., Sun J. F., Zhu Y. S., Hartung E. Generation of Cretaceous high-silica granite by complementary crystal accumulation and silicic melt extraction in the coastal region of southeastern China // *Geol. Soc. Am. Bull*. 2022. Vol. 134. P. 201–222

11. Perez-Soba C., Villaseca C. Petrogenesis of highly fractionated I-type peraluminous granites: La Pedriza pluton (Spanish Central System) // *Geol. Acta*. 2010. Vol. 8. P. 131–149

12. Ballouard C., Poujol M., Boulvais P., Branquet Y., Tartese R., Vigneresse J.L. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition // *Geology*. 2016. Vol. 44. No. 3. P. 231–234

13. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1999. Vol. 63. P.

489–508

14. Савко К. А., Самсонов А. В., Ларионов А. Н., Ларионова Ю. О., Базиков Н. С. Палеопротерозойские граниты А- и S-типов востока Воронежского кристаллического массива: геохронология, петрогенезис и тектоническая обстановка формирования // *Петрология*. 2014. Т. 22. № 3. С. 235–264
15. Савко К. А., Самсонов А. В., Гончаров Д. А., Терентьев Р. А., Ларионов А. Н., Кориш Е. Х. Корни разрушенной палеопротерозойской островной дуги в Волго-Донском океане, Восточно-Сарматский составной террейн: геохимия, возраст и петрогенезис // *Петрология*. 2026. В печати.
16. Gorbatshev R., Bogdanova S. Frontiers in the Baltic Shield // *Precam. Res.* 1993. Vol. 64. P. 3–21
17. Бибикова Е. В., Богданова С. В., Постникова А. В., Попова Л. П., Кирнозова Т. И., Фугзан М. М., Глущенко В. В. Зона сочленения Сарматии и Волго-Уралии: изотопно-геохронологическая характеристика супракrustальных пород и гранитоидов // *Стратиграфия и геологическая корреляция*. 2009. Т. 17. № 6. С. 3–16
18. Савко К. А., Самсонов А. В., Базиков Н. С. Метатерригенные породы воронцовской серии Воронежского кристаллического массива: геохимия, особенности формирования и источники сноса // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология*. 2011. № 1. С. 70–94
19. Савко К. А., Самсонов А. В., Базиков Н. С., Ларионова Ю. О., Хиллер В. В., Вотяков С. Л., Скрябин В. Ю., Козлова Е. Н. Гранитоиды востока Воронежского кристаллического массива: геохимия, Th-U-Pb возраст и петрогенезис // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология*. 2011. № 2. С. 98–115.
20. Terentiev R. A., Santosh M. Detrital zircon geochronology and geochemistry of metasediments from the Vorontsovka terrane: implications for microcontinent tectonics // *International Geology Review*. 2016. Vol. 58. no. 9. P. 1108–1126
21. Щипанский А. А., Самсонов А. В., Петрова А. Ю., Ларионова Ю. О. Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое // *Геотектоника*. 2007. № 1. С. 43–70
22. Terentiev R. A., Skryabin V. Y., Santosh M. U–Pb zircon geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic magmatic suite from East Sarmatian Orogen: Tectonic implications on Columbia supercontinent // *Prec. Res.* 2016. Vol. 273. P. 165–184
23. Janousek V., Farrow C. M., Erban V. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit) // *J. Petrol.* 2006. Vol. 47. No 6. P. 1255–1259
24. Janousek V., Farrow C. M., Erban V. GCDkit. Mineral – a customizable R-language environment for recalculation, plotting and classification of electron-microprobe analyses of common rock-forming minerals // *Amer. Mineral.* 2023. Vol. 109. No. 9. P. 1598–1607
25. Frost B. R., Barnes C. G., Collins W. J., Arculus R. J., Ellis D. J., Frost C. D. A geochemical classification for granitic rocks // *J. Petrol.* 2001. Vol. 42. No 11. P. 2033–2048
26. Middlemost E. Naming materials in the magma/igneous rock system // *Earth-Sci. Rev.* 1994. Vol. 37. No 3–4. P. 215–224
27. O'Connor J. T. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios // *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 1965. Vol. 525-B. P. B79–B8.
28. El Bouseily A. M., El Sokkary A. A. The relation between Rb, Ba and Sr in granitic rocks // *Chemical Geology*. 1975. Vol. 16. P. 207–219
29. Boynton W. V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // *Rare Earth Element Geochemistry*. 1984. Vol. 2. P. 63–114
30. Sun S.-s., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Geological Society Special Publication*. 1989. Vol. 42. P. 313–345
31. Whalen J. B., Currie K. L., Chappell B. W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1987. Vol. 95. P. 407–419
32. Bonin B., Janoušek V., Moyen J. Chemical variation, modal composition and classification of granitoids // *Special Publications*. 2020. Vol. 491. P. 9–51
33. Frost B. R., Frost C. D. A Geochemical Classification for Feldspathic Igneous Rocks // *Journal of Petrology*. 2008. Vol. 49. P. 1955–1969
34. Дубинина Е. О., Авдеев А. С., Волков В. Н., Коссова С. А., Ковальчук Е. В. Высокофракционированные граниты массива Раумид (Южный Памир): изотопное ( $\delta^{18}\text{O}$ ) и геохимическое изучение // *Петрология*. 2023. Т. 31. № 4. С. 349–375
35. Grebennikov A. V. A-type granites and related rocks: Petrogenesis and classification // *Russian Geology and Geophysics*. 2014. Vol. 55 (11). P. 1353–1366
36. Claiborne L. L., Miller C. F., Walker B. A., Wooden J. L., Mazdab F. K., Bea F. Tracking magmatic processes through Zr/Hf ratios in rocks and Hf and Ti zoning in zircons: An example from the Spirit Mountain batholith, Nevada // *Mineral Mag.* 2006. Vol. 70. P. 517–543
37. Breiter K., Lamarao C. N., Borges R. M. K., Dall'Agnol R. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites // *Lithos*. 2014. Vol. 192–195. P. 208–225
38. Bau M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1996. Vol. 123. P. 323–333
39. Miller C. F., Mittlefehldt D. W. Depletion of light rare-earth elements in felsic magmas // *Geology*. 1982. Vol. 10. P. 129–133
40. Miller C. F., Mittlefehldt D. W. Extreme fractionation in felsic magma chambers: A product of liquid-state diffusion or fractional crystallization? // *Earth Planet Sci Lett.* 1984. Vol. 68. P. 151–158
41. Gelman S. E., Deering C. D., Bachmann O., Huber C., Gutiérrez F. J. Identifying the crystal graveyards remaining after large silicic eruptions // *Earth Planet Sci Lett.* 2014. Vol. 403. P. 299–306
42. Eby N. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis // *Lithos*. 1990. Vol. 26. P. 115–134
43. Wu F., Yang J., Xu Y., Wilde S. A., Walker R. J. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2019. Vol. 47. P. 173–195
44. 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. P. 295–304
45. Li X., Zhang C. Machine learning thermobarometry for biotite-bearing magmas // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2022. Vol. 127. No. 9.



## The first discovery of Paleoproterozoic highly fractionated granites in the south of the Vorontsovka terrane of the Volga-Don Orogen

©2025 D. A. Goncharov<sup>1,2</sup>✉, K. A. Savko<sup>3,4</sup>, R. A. Terentiev<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Lomonosov Moscow State University,*

*Leninskie gory 1, 119990, Moscow, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,*

*Bolshaya Gruzinskaya str. 10 building 1, 123995, Moscow, Russian Federation*

<sup>3</sup> *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry  
of the Russian Academy of Sciences, 109035, Moscow, Staromonetny Lane 35, Russian Federation*

<sup>4</sup> *Voronezh State University, 1 Universitetskaya pl., 394018, Voronezh, Russian Federation*

### Abstract

**Introduction:** granites make up a significant part of the continental crust and contain information about the geodynamic regimes of the upper part of the lithosphere. According to their characteristics, they are divided into unfractionated, which are usually considered in terms of alphabetical classification, and fractionated, which are formed from magmas that have undergone significant fractional crystallization processes. Such magmas are usually high-temperature and fluid-saturated, which is reflected in the absence of mafic minerals and the presence of minerals from rare earths. They are enriched in LILE, have low Nb/Ta and Zr/Hf ratios, negative Eu\* anomalies, and a tetrad effect in the REE distribution. The article is devoted to mineralogy, geochemistry and petrogenesis of a new type of highly fractionated granites of the Vorontsovka terrane.

**Methodology:** the chemical composition of the samples was determined using an S8 Tiger X-ray fluorescence spectrometer (Bruker AXS GmbH, Germany) at Voronezh State University. Small and rare elements were determined by the induction-coupled plasma method with mass spectrometric termination of analysis (ICP-MS) in the laboratory of Physical and Chemical Methods of Mineral Matter Research at the Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Local analyses of minerals were performed using a Jeol 6380LV scanning electron microscope with an INCA 250 quantitative energy dispersion analysis system at Voronezh State University and a Tescan Mira IV scanning electron microscope with an X-Max 80 energy dispersion (EDX) spectrometer at Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.

**Results and discussion:** granitoids are massive medium-grained rocks with hypidiomorphic and poikilitic structures. They are composed of plagioclase (35–40 vol. %), microcline (up to 30 vol. %), quartz (20–25 vol. %), muscovy (up to 10 vol. %) and biotite (up to 10 vol. %). They are characterized by high SiO<sub>2</sub> contents (71–75 wt. %) and alkalis (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O = 9–14.2 wt. %) with a predominance of potassium over sodium (K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O = 1.1–5.6), low concentrations of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9.4–12.8 wt%). They are depleted of siderophilic, highly charged, and lithophilic elements, with the exception of Li (4–130 ppm) and Rb (120–140 ppm). They contain low concentrations of REE ( $\Sigma$ REE = 11–36 ppm), with a moderate enrichment of LREE relative to HREE (La/Yb<sub>N</sub> = 2.87–13.48) and a negative Eu anomaly (Eu/Eu\* = 0.4–0.56). They are ferruginous, alkaline and metaluminous rocks, which does not allow them to be attributed to any of the



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

---

✉ Denis A. Goncharov, e-mail: [geosci31@gmail.com](mailto:geosci31@gmail.com)

types of alphabetical classification, and suggests that they belong to a highly fractionated type. This is indicated by the presence of fluorite and xenotime, high concentrations of Li and Rb, and low ratios of Nb/Ta and Zr/Hf. The compositions of the studied granites and S-type granites of the Vorontsovka terrane form a single trend of fractional crystallization and suggest that Paleoproterozoic (2050–2070 Ma) S-type granites were fractionated. The temperature of biotite crystallization and saturation of the melt with zirconium indicates the formation of melts within the middle crust. The formation of S-type granites occurred as a result of melting of immature Vorontsovka series meta-sediments as a result of increased heat flow on the flank of the collisional orogen.

**Conclusions:** in the southern part of the Vorontsovka terrane, alkaline and metaluminous ferroan granitoids have been identified for the first time. The distribution of petrogenic and REE indicates that they belong to a highly fractionated type, while petrographic characteristics and features of geochemical affinity indicate that S-type melts were fractionated.

**Keywords:** highly fractionated granites, Paleoproterozoic, Vorontsovka terrane, Eastern Sarmatia, rare earth elements, REE, 2050–2070 Ma, Volga-Don orogen

**Funding:** This work was supported by ongoing institutional funding under research project 124022400143-9 for the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences.

**For citation:** Goncharov D. A., Savko. K. A., Terentiev R. A. The first discovery of Paleoproterozoic highly fractionated granites in the south of the Vorontsovka terrane of the Volga-Don Orogen // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2025, no. 4, pp. 45–58. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2025/4/45-58>

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

## REFERENCES

- Hawkesworth C. J., Kemp A. I. S. Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution. *Chemical Geology*, 2006, vol. 226, pp. 0–162
- Bonin B. A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, 2007, vol. 97, pp. 1–29
- Brown M. Granite: From genesis to emplacement. *Geological Society of America Bulletin*, 2012, vol. 125, pp. 1079–1113
- Barbarin B. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 1999, vol. 46, pp. 605–626
- Wu F., Liu X., Ji W., Wang J., Yang L. Highly fractionated granites: Recognition and research. *Sci. China Earth Sci.*, 2017, vol. 60, pp. 1201–1219
- Gao P., Zheng Y., Zhao Z. Experimental melts from crustal rocks: A lithochemical constraint on granite petrogenesis. *Lithos*, 2016, vol. 266–267, pp. 133–157
- Wu F., Liu X., Liu Z., Wang R., Xie L., Wang J., Ji W., Yang L., Liu C., Khanal G., He S. Highly fractionated Himalayan leucogranites and associated rare-metal mineralization. *Lithos*, 2020, vol. 105319, pp. 352–353
- Wang R., Wu, F., Xie L., Liu X., Wang J., Yang L., Lai W., Liu C. A preliminary study of rare-metal mineralization in the Himalayan leucogranite belts, South Tibet. *Sci. China Earth Sci.*, 2017, vol. 60, pp. 1655–1663
- Lee C. A., Morton D. M. High silica granites: Terminal porosity and crystal settling in shallow magma chambers. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2015, vol. 409, pp. 23–31
- Chen J. Y., Yang J. H., Zhang J. H., Sun J. F., Zhu Y. S., Hartung E. Generation of Cretaceous high-silica granite by complementary crystal accumulation and silicic melt extraction in the coastal region of southeastern China. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2022, vol. 134, pp. 201–222
- Perez-Soba C., Villaseca C. Petrogenesis of highly fractionated I-type peraluminous granites: La Pedriza pluton (Spanish Central System). *Geol. Acta*, 2010, vol. 8, pp. 131–149
- Ballouard C., Poujol M., Boulvais P., Branquet Y., Tartese R., Vigneresse J. L. Nb-Ta fractionation in peraluminous granites: A marker of the magmatic-hydrothermal transition. *Geology*, 2016, vol. 44, no. 3, pp. 231–234
- Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu\*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1999, vol. 63, pp. 489–508
- Savko K. A., Samsonov A. V., Larionov A. N., Larionova Ju. O., Bazikov N. S. Paleoproterozojskie granity A- i S-tipov vostochno-Voronezhskogo kristallicheskogo massiva: geohronologija, petrogenezis i tektonicheskaja obstanovka formirovanija [Paleoproterozoic A- and S-granites in the eastern Voronezh Crystalline Massif: Geochronology, petrogenesis, and tectonic setting of origin]. *Petrologija – Petrology*, 2014, vol. 22, pp. 205–233 (In Russ.)
- Savko K. A., Samsonov A. V., Goncharov D. A., Terent'ev R. A., Larionov A. N., Korish E. H. Korni razrushennoj paleoproterozojskoj ostrovnnoj dugi v Volgo-Donskom okeane, Vostochno-Sarmatskij sostavnoj terrej: geohimija, vozrast i petrogenezis [The roots of the destroyed Paleoproterozoic Island arc in the Volga-Don Ocean, East Sarmatian Composite Terrane: geochemistry, age, and petrogenesis]. *Petrologija – Petrology*, 2026. In press.
- Gorbatshev R., Bogdanova S. Frontiers in the Baltic Shield. *Precam. Res.*, 1993, vol. 64, pp. 3–21
- Bibikova E. V., Bogdanova S. V., Postnikova A. V., Popova L. P., Kirmozova T. I., Fugzan M. M., Glushchenko V. V. Zona sochlenenija Sarmatii i Volgo-Uralii: izotopno-geohronologicheskaja harakteristika suprakrustal'nyh porod i granitoidov [Sarmatia-Volgo-Uralia junction zone: Isotopic-geochronologic characteristic of supracrustal rocks and granitoids]. *Stratigrafija i geologicheskaja korrelyacija – Stratigraphy and Geological Correlation*, 2009, vol. 17, pp. 561–573 (In Russ.)
- Savko K. A., Samsonov A. V., Bazikov N. S. Metaterriгенные породы воронцовской серии Воронежского кристаллического массива: геохимия, особенности формирования и истоки сноса [Metaterriгенous rocks of the Vorontsovskaya series of the Voronezh crystalline massif: geochemistry, formation features, and sources of demolition]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2011, no. 1, pp. 70–94 (In Russ.)
- Savko K. A., Samsonov A. V., Bazikov N. S., Larionova Y. O., Hiller V. V., Votyakov S. L., Skryabin V. Y., Kozlova E. N. Granitoidy vostochno-Voronezhskogo kristallicheskogo massiva: geohimija, Th-U-Pb vozrast i petrogenezis [Granitoids of the east of the

Voronezh crystal massif: Geochemistry, Th-U-Pb age and petrogenesis]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2011, no. 2, pp. 98–115 (In Russ.)

20. Terentiev R. A., Santosh M. Detrital zircon geochronology and geochemistry of metasediments from the Vorontsovka terrane: implications for microcontinent tectonics. *International Geology Review*, 2016, vol. 58, no. 9, pp. 1108–1126

21. Shhipanskij A. A., Samsonov A. V., Petrova A. Ju., Larionova Ju. O. Geodinamika vostochnoj okrainy Sarmatii v paleoproterozoje [Geodynamics of the eastern margin of Sarmatia in the Paleoproterozoic]. *Geotektonika – Geotecton*, 2007, vol. 41, pp. 38–62 (In Russ.)

22. Terentiev R. A., Skryabin V. Y., Santosh M. U–Pb zircon geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic magmatic suite from East Sarmatian Orogen: Tectonic implications on Columbia supercontinent. *Prec. Res.*, 2016, vol. 273, pp. 165–184

23. Janousek V., Farrow C. M., Erban V. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *J. Petrol.*, 2006, vol. 47, no 6, pp. 1255–1259

24. Janousek V., Farrow C. M., Erban V. G CDkit. Mineral – a customizable R-language environment for recalculation, plotting and classification of electron-microprobe analyses of common rock-forming minerals. *Amer. Mineral.*, 2023, vol. 109, no. 9, pp. 1598–1607

25. Frost B. R., Barnes C. G., Collins W. J., Arculus R. J., Ellis D. J., Frost C. D. A geochemical classification for granitic rocks. *J. Petrol.*, 2001, vol. 42, no 11, pp. 2033–2048

26. Middlemost E. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Sci. Rev.*, 1994, vol. 37, no 3–4, pp. 215–224

27. O'Connor J.T. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 1965, vol. 525-B, pp. B79–B84.

28. El Bouseily A. M., El Sokkary A. A. The relation between Rb, Ba and Sr in granitic rocks. *Chemical Geology*, 1975, vol. 16, pp. 207–219

29. Boynton W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *Rare Earth Element Geochemistry*, 1984, vol. 2, pp. 63–114

30. Sun S-s., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publication*, 1989, vol. 42, pp. 313–345

31. Whalen J. B., Currie K. L., Chappell B. W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, vol. 95, pp. 407–41

32. Bonin B., Janoušek V., Moyen J. Chemical variation, modal composition and classification of granitoids. *Special Publications*, 2020, vol. 491, pp. 9–51

33. Frost B. R., Frost C. D. A Geochemical Classification for Feldspathic Igneous Rocks. *Journal of Petrology*, 2008, vol. 49, pp. 1955–1969

34. Dubinina E. O., Avdeenko A. S., Volkov V. N., Kossova S. A., Koval'chuk E. V. Vysokofrakcionirovannye granity massiva Raumid (Juzhnyj Pamir): izotopnoe ( $\delta^{18}\text{O}$ ) i geohimicheskoe izuchenie [Highly fractionated granites of the Raumid massif (Southern Pamir): isotopic ( $\delta^{18}\text{O}$ ) and geochemical study]. *Petrologiya – Petrology*, 2023, vol. 31, no. 4, pp. 349–375 (In Russ.)

35. Grebennikov A. V. A-type granites and related rocks: Petrogenesis and classification. *Russian Geology and Geophysics*, 2014, vol. 55, pp. 1353–1366

36. Claiborne L. L., Miller C. F., Walker B. A., Wooden J. L., Mazdab F. K., Bea F. Tracking magmatic processes through Zr/Hf ratios in rocks and Hf and Ti zoning in zircons: An example from the Spirit Mountain batholith, Nevada. *Mineral Mag.*, 2006, vol. 70, pp. 517–543

37. Breiter K., Lamarao C. N., Borges R. M. K., Dall'Agnol R. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites. *Lithos.*, 2014, vol. 192–195, pp. 208–225

38. Bau M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1996, vol. 123, pp. 323–333

39. Miller C. F., Mittlefehldt D. W. Depletion of light rare-earth elements in felsic magmas. *Geology*, 1982, vol. 10, pp. 129–133

40. Miller C. F., Mittlefehldt D. W. Extreme fractionation in felsic magma chambers: A product of liquid-state diffusion or fractional crystallization? *Earth Planet Sci Lett.*, 1984, vol. 68, pp. 151–158

41. Gelman S.E., Deering C.D., Bachmann O., Huber C., Gutiérrez F.J. Identifying the crystal graveyards remaining after large silicic eruptions. *Earth Planet Sci Lett.*, 2014, vol. 403, pp. 299–306

42. Eby N. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos.*, 1990, vol. 26, pp. 115–134

43. Wu F., Yang J., Xu Y., Wilde S. A., Walker R. J. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences.*, 2019, vol. 47, pp. 173–195

44. 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

45. Li X., Zhang C. Machine learning thermobarometry for biotite-bearing magmas. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, vol. 127, no. 9.

Гончаров Денис Андреевич, инженер, Институт Физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта; магистрант, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация; e-mail: geosci31@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8155-0589>

Савко Константин Аркадьевич, д.г.-м.н., в.н.с. Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. Москва; профессор, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: ksavko@geol.vsu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7291-7024>

Терентьев Роман Анатольевич, к.г.-м.н., в.н.с., Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: terentiev@geol.vsu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9733-6085>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Denis A. Goncharov, Engineer at Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences; master's degree student, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation; e-mail: geosci31@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8155-0589>

Konstantin A. Savko, PhD in Geol.-Min., Leading Researcher at the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences. Moscow; Professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: ksavko@geol.vsu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7291-7024>

Roman A. Terentiev, PhD in Geol.-Min., Leading Researcher, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: terentiev@geol.vsu.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9733-6085>

Authors have read and approved the final manuscript.