

**Петротип неоархейского атаманского комплекса
гранитов Курского блока Сарматии:
геохимия, геохронология, изотопная систематика**

© 2020 К. А. Савко^{1✉}, Н. В. Холина¹, А. В. Самсонов², Е. Х. Кориш¹,
М. В. Червяковская³, Н. С. Базиков¹, А. Н. Ларионов⁴

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

²*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии
Российской академии наук, Старомонетный пер., 35, 119017, Москва, Российская Федерация*

³*Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого, Уральского отделения Российской
академии наук, ул. Вонсовского, 15, 620016, Екатеринбург, Российская Федерация*

⁴*Центр изотопных исследований Всероссийского научно-исследовательского геологиче-
ского института им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Средний пр., 74, 199106, Санкт-Петербург,
Российская Федерация*

Аннотация

Введение: Атаманский комплекс, как и большинство раннедокембрийских магматических и метаморфических комплексов Воронежского кристаллического массива не имел современного прецизионного геохронологического обоснования и геохимических характеристик. Цель работы – дать максимально полное описание петротипа Атаманского массива одноименного комплекса.

Методика: Определены содержания петрогенных, малых и редких элементов в породах Атаманского массива, изучена их Sm-Nd и Lu-Hf изотопия, произведены локальные анализы минералов, определен возраст пород U-Pb методом по циркону.

Результаты и обсуждение: Атаманский массив, являющийся петротипом атаманского комплекса в Курском блоке Сарматии, контрастно отличается от остальных раннедокембрийских гранитоидов Воронежского кристаллического массива. Граниты атаманского комплекса имеют возраст 2.61 млрд лет, высокие содержания кремнезема, низкие – кальция и стронция, очень высокую железистость и глубокие европиевые аномалии. Lu-Hf изотопный состав циркона и Sm-Nd валовых проб свидетельствуют о длительной коровой истории протолитов и гетерогенности палеоархейских коровых источников.

Заключение: Атаманские граниты образуют локально проявленную единую вулканоплутоническую ассоциацию с высококремнистыми риолитами лебединской свиты. Граниты образовались при высокотемпературном малоглубинном плавлении во внутриплитной обстановке в результате подъема мантийного плюма и внедрения в кору базальтовых магм, послуживших источниками тепла.

Ключевые слова: Курский блок, граниты, U-Pb изотопный возраст, изотопная систематика, источники расплавов, петротип.

Источник финансирования: Работа поддержана проектами РФФИ № 19-05-00159 и РНФ № 16-17-10283 и госзаданием ИГЕМ РАН «Петрология и минерагения магматизма внутриплитных и посторогенных обстановок: роль литосферных и астеносферных источников в формировании расплавов».



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

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

Введение

Подавляющее большинство раннедокембрийских магматических и метаморфических комплексов и метаморфизованных стратифицированных подразделений Воронежского кристаллического массива до последнего десятилетия не имело современного прецизионного геохронологического обоснования и геохимических характеристик. Такая ситуация затрудняла создание достоверных легенд и схем стратиграфии и магматизма раннего докембрия и расшифровку эволюции геологических процессов.

Не является исключением и атаманский комплекс, который был выделен в 1976 г. [1] и объединял тогда все раннедокембрийские существенно калиевые щелочные гранитоиды Воронежского кристаллического массива (ВКМ). К нему были отнесены массивы размером от 20 до 100 км², главным образом, в пределах древних архейских блоков. Впоследствии оказалось, что калиевые гранитоиды чрезвычайно разнообразны по составу и возрасту, и из атаманского комплекса стали вычленивать все новые комплексы, что нашло отражение в последней корреляционной схеме стратиграфии и магматизма раннего докембрия Воронежского кристаллического массива [2].

В Донском террейне выделены лискинский комплекс постколлизийных гранитов А-типа с возрастом 2064 млн лет [3] и павловский комплекс батолитов извостково-щелочных гранитоидов пестрого состава с возрастом около 2.06–2.07 млрд лет [4]. В Лосевском террейне многочисленны батолиты гранитов I-типа и мигматиты с возрастом 2100–2075 млн лет [5] были объединены в усманский комплекс, а граниты из кольцевой Ольховской интрузии с возрастом 2066 млн лет [6, 7] – в ольховский комплекс. На востоке ВКМ в Воронцовском террейне все граниты объединены в бобровский комплекс, хотя среди них выделяются постколлизийные граниты А- и S-типов, имеющие одинаковый возраст 2050 млн лет [8]. В Курском блоке палеопротерозойские калиевые гранодиориты I-типа с возрастом около 2050 млн лет [9] в Тим-Ястребовской структуре были отнесены к стойло-николаевскому комплексу [10], а калиевые граниты и сиениты в Белгородской структуре – соответственно к малиновскому [11] и шебекинскому комплексам. В результате, достоверно относимых к атаманскому комплексу проявлений архейских калиевых гранитоидов за пределами палеопротерозойских структур осталось совсем немного.

Цель настоящей работы – дать максимально полное описание петротипа неархейского Атаманского массива одноименного комплекса: петрографии и минералогии, прецизионного абсолютного возраста, элементной и изотопной геохимии, геодинамической обстановки.

Геологическая ситуация

Курский блок представляет собой крупный сегмент континентальной коры, консолидированной около 2.8 млрд лет назад [12, 13] (рис. 1). В конце архея 2.7–2.6 млрд лет назад этот блок подвергся воздействию плюма, который распознается по внутриплитному кислотному и базитовому магматизму и, вероятно, сопряженному рифтогенезу [12, 14]. В интервале 2.60–2.45 млрд лет назад Курский блок представлял собой стабильную платформу; в морских бассейнах на пассивной континентальной окраине происходило накопление терригенных осадков, карбонатных платформ и железисто-кремнистых формаций (ЖКФ) [15, 16]. В интервале 2.40–2.20 млрд лет назад наступил длительный перерыв в осадконакоплении, сопровождавшийся эрозией, когда до рубежа около 2.3 млрд лет назад накапливались только континентальные отложения. Таким образом, в интервале с 2.6 до 2.2 млрд лет назад Курский блок представлял собой стабильную платформу, пеньпен с корами выветривания и осадконакоплением, включая железисто-кремнистые формации, на фоне эндогенного затишья.

В период 2.20–2.06 млрд лет назад палеопротерозойская платформа Курского блока претерпела интенсивную эндогенную переработку, включая магматизм, рифтогенез, складчатость и метаморфизм, которые были связаны с субдукционными и коллизионными процессами в ходе эволюции обрамляющих Курский блок палеопротерозойских Волго-Донского и Ингуло-Севского орогенов. В ходе этих событий был сформирован структурный облик Восточной Сарматии (рис. 1).

Локальные проявления гранитов атаманского комплекса сосредоточены в Курском блоке между Тим-Ястребовской и Волотовской палеопротерозойскими синформами (рис. 1). Они характеризуются мозаичным магнитным полем, в гравитационном поле не отличаются от вмещающих пород. Калиевые граниты характеризуются низкой плотностью (2.61–2.69 г/см³) и являются практически не магнитными. По отношению к вмещающим мигматитам и гнейсам они обладают отрицательной избыточной плотностью до 0.5–0.7 г/см³. Массивы атаманского комплекса картируются по локальным минимумам первой производной силы тяжести. Магнитное поле в пределах гравитационных минимумов отрицательно по интенсивности и не имеет четко выраженных локальных осложнений. Однозначное геологическое отождествление массивов атаманского комплекса возможно только по данным бурения.

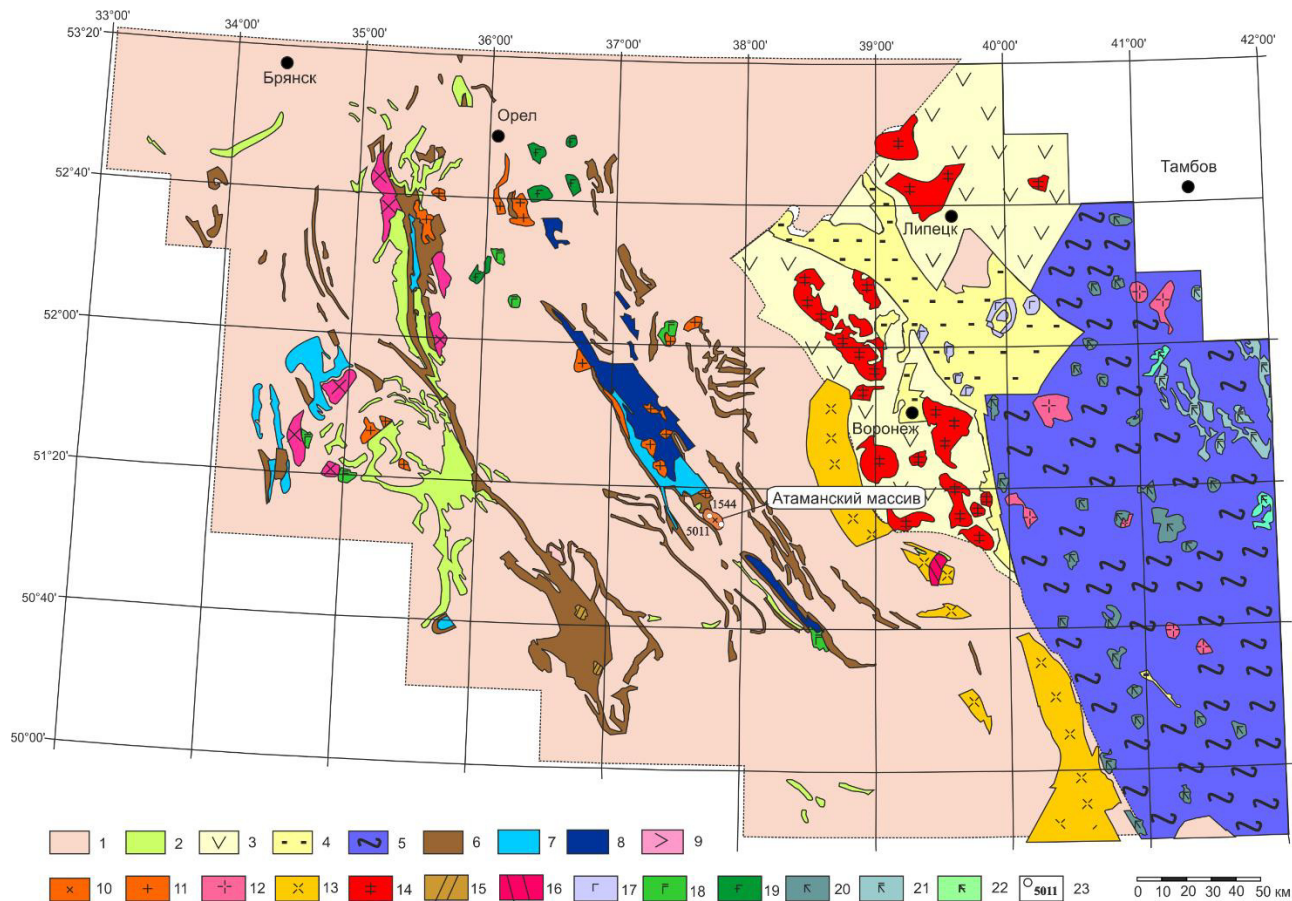


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Воронежского кристаллического массива: 1 – обоянский комплекс, 2 – михайловская серия, 3 – лосевская свита, 4 – воронежская свита, 5 – воронцовская серия, 6 – курская серия, 7 – роговская свита, 8 – тимская свита, 9 – салтыковский комплекс, 10 – атаманский комплекс, 11 – стойло-николаевский комплекс, 12 – бобровский комплекс, 13 – павловский комплекс, 14 – усманский комплекс, 15 – шебекинский комплекс, 16 – лискинский комплекс, 17 – ольховский комплекс, 18 – золотухинский комплекс, 19 – смородинский комплекс, 20 – мамонский комплекс, 21 – новогольский комплекс, 22 – еланский комплекс, 23 – буровые скважины.

[Fig. 1. A sketch map of the Voronezh Massif: 1 – Oboyan Complex, 2 – Mikhailovka Group, 3 – Losevo Group, 4 – Voronezh Formation, 5 – Vorontsovka Group, 6 – Kursk Group, 7 – Rogovoe Formation, 8 – Tim Formation, 9 – Saltyki Complex, 10 – Atamansky Complex, 11 – Stoilo-Nikolaev Complex, 12 – Bobrov Complex, 13 – Pavlovsk Complex, 14 – Usman Complex, 15 – Shebekino complex, 16 – Liski Complex, 17 – Ol'khovka Complex, 18 – Zolotukhino Complex, 19 – Smorodino Complex, 20 – Mamon Complex, 21 – Novogol Complex, 22 – Elan Complex, 23 – drillhole numbers.]

Граниты атаманского комплекса в течение долгого времени считались раннепротерозойскими на основании калий-аргоновых определений их радиологического возраста. После получения новых геохронологических данных [17] их возраст в корреляционной схеме стратиграфии и магматизма раннего докембрия Воронежского кристаллического массива [2] был пересмотрен и признан позднеархейским.

Петротипическим является Атаманский массив в юго-восточном замыкании Тим-Ястребовской палеопротерозойской структуры. Он имеет в плане эллипсоидную форму, вытянутую в северо-западном направлении и площадь 62 км² (рис. 2). Возраст атаманского массива оценивается как 2615 ± 70 млн лет [17]. Вмещающими породами для калиевых гранитов атаманского комплекса являются палеоархейские ортогнейсы обоянского комплекса.

Аналитические методы исследований

Химический состав проб определен на рентгенофлуоресцентном спектрометре S8 Tiger (Bruker AXS GmbH, Германия) в Воронежском госуниверситете. 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 калировке 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).

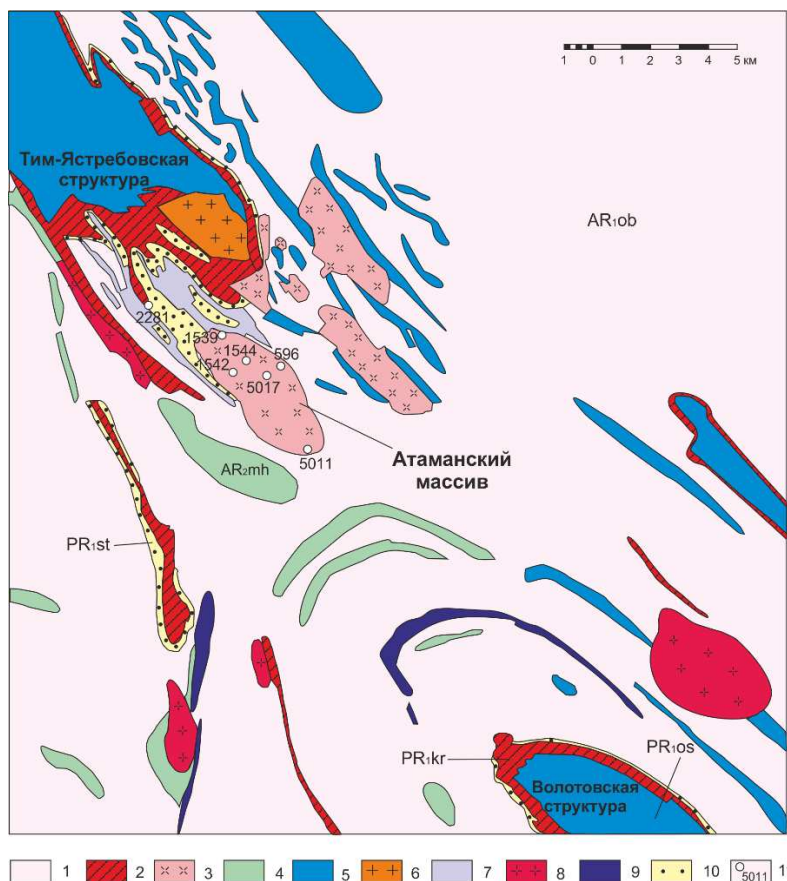


Рис. 2. Схематическая геологическая карта южного обрамления Тим-Ястребовской структуры: 1 – обоянский комплекс, 2 – коробковская свита, 3 – атаманский комплекс, 4 – михайловская серия, 5 – оскольская серия, 6 – стойло-николаевский комплекс, 7 – лебединская свита, 8 – салтыковский комплекс, 9 – дубравинский комплекс, 10 – стойленская свита, 11 – опробованные скважины.

[Fig. 2. A sketch map of the southern margin of Tim-Yastrebovka structure: 1 – Oboyan Complex, 2 – Korobki Formation, 3 – Atamansky Complex, 4 – Mikhailovka Group, 5 – Oskol Group, 6 – Stoilo-Nikolaev Complex, 7 – Lebedinskaya Formation, 8 – Saltyki Complex, 9 – Dubravinka Complex, 10 – Stoilo Formation, 11 – drillhole numbers.]

Малые и редкие элементы определяли методом индукционно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием анализа (ICP-MS) в АСИЦ ИПТМ РАН. Разложение образцов пород, в зависимости от их состава, проводили путем кислотного вскрытия как в открытой, так и в закрытой системах. Пределы обнаружения для REE, Hf, Ta, Th, U составляли 0.02–0.03 ppm, для Nb, Be, Co – 0.03–0.05 ppm, для Li, Ni, Ga, Y – 0.1 ppm, для Zr – 0.2 ppm, для Rb, Sr, Ba – 0.3 ppm, для Cu, Zn, V, Cr – 1–2 ppm. Правильность анализа контролировалась путем измерения международных и российских стандартных образцов GSP-2, BM, СГД-1А, СТ-1. Ошибки определения концентраций составляли от 3 до 5 мас. % для большинства элементов.

Локальные анализы минералов выполнены на электронном микроскопе Jeol 6380LV с системой количественного энергодисперсионного анализа «Inca» (Воронежский госуниверситет). 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 проводились с помощью комплекта программ математического обеспечения системы. Точность анализа систематически контролировалась по эталонным образцам природных и синтетических минералов.

Выделение акцессорного циркона проводилось по стандартной методике с использованием тяжелых жидкостей. Изотопные U–Pb определения абсолют-

ного возраста выполнены в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) на ионном микрозонде SHRIMP II с использованием эталонных цирконов “91500” и “Темора”.

Изотопный анализ Sm и Nd производился на девятиколлекторном масс-спектрометре TRITON в статическом режиме в ЦИИ ВСЕГЕИ. Коррекция на изотопное фракционирование неодима производилась при помощи нормализации измеренных значений по отношению $^{148}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.241578$. Нормализованные отношения приводились к значению $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511860$ в международном изотопном стандарте La Jolla. Погрешность определения содержания Sm и Nd составила 0.5 %.

Изучение Lu–Hf-изотопного состава цирконов выполнено на многоколлекторном масс-спектрометре Neptune Plus с приставкой для лазерной абляции проб NWR 213 в Институте геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург. Проведена оптимизация работы масс-спектрометра и приставки для лазерной абляции с использованием образцов сравнения циркона Mud Tank, GJ-1 [18, 19]. Неопределенность единичного измерения отношения $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ в виде 2SD – в интервале 0.005–0.008 %. Неопределенность единичного определения значения $\epsilon(\text{Hf})$ в виде 2 δ варьировала для перечисленных стандартов в интервале 5–9 %. Операционные параметры приставки для лазерной абляции: плотность энергии лазерного излучения – 14 Дж/см², частота повторения импульсов – 20 Гц, диаметр кратера – 25 мкм. Для об-

работки Lu-Hf данных был использован макрос Hf-INATOR для Excel [20].

Петрография и минералогия

Атаманский массив в центральной части сложен массивными биотитовыми гранитами, а в краевых частях отмечаются гранит-порфиры.

Граниты атаманского комплекса розовые, розовато-серые, средне- и крупнозернистые, иногда с гнейсовидной текстурой с черным и голубоватым кварцем. Структура гранитная, гипидиоморфнозернистая

(рис. 3). Встречаются овоиды микроклина или сростаний нескольких зерен размером 1–2 см, редко до 5 см, которые имеют каймы кварца и плагиоклаза. Состав (мас. %) – плагиоклаз – 25–35, микроклин – 35–40, кварц – 30–35, биотит – 7, мусковит – 2–3, роговая обманка < 1, эпидот < 1 (рис. 3). Плагиоклаз представлен альбитом (An₀₋₁₀) (табл. 1). Микроклин может быть обогащен барием (до 3.5 мас. % BaO). Акцессорные минералы представлены титанитом, рутилом, цирконом, монацитом.

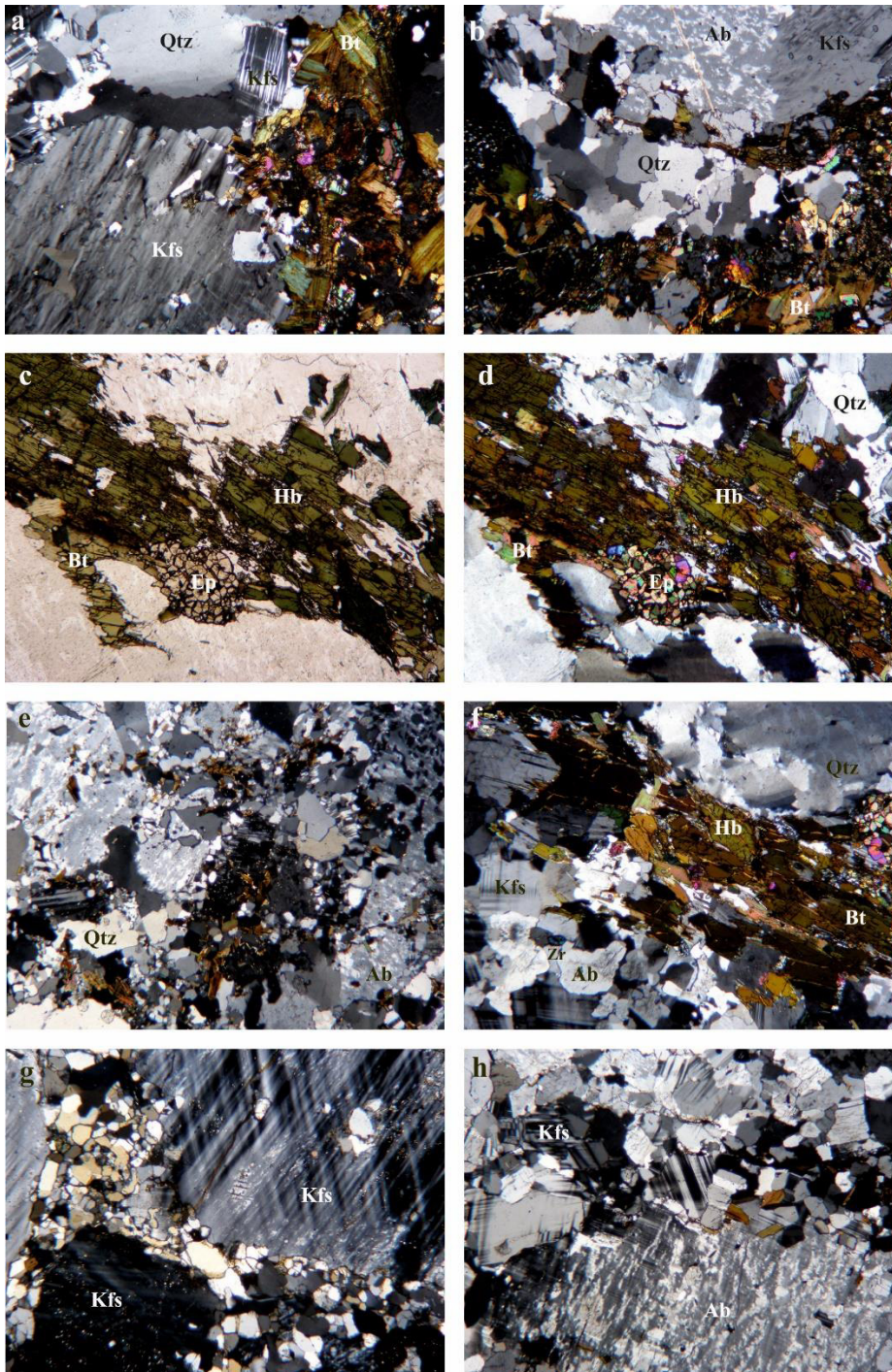


Рис. 3. Фото шлифов гранитов Атаманского массива: *a* – образец 5017/139; *b* – образец 5017/161; *c, d* – образец 5011/154.5 (в проходящем и поляризованном свете); *e* – обр. 1539/191.7; *f* – обр. 5011/154.5; *g* – обр. 1539/177; *h* – образец 5017/134. Аббревиатура минералов по [21].

[Fig. 3. Photomicrographs of the granites thin sections: *a* – sample 5017/139; *b* – sample 5017/161; *c, d* – sample 5011/154.5 (transmitted and polarized light); *e* – sample 1539/191.7; *f* – sample 5011/154.5; *g* – sample 1539/177; *h* – sample 5017/134. Mineral abbreviations after [21].]

Табл. 1. Составы полевых шпатов из гранитов Атаманского массива
[Table 1. Feldspar from the Atamansky massif granites compositions]

Скв./глубина [Drill hole/depth]	594/ 121	1544/ 198.6	1544/ 210	594/ 121	5011/ 154.5	5011/ 154.5	5011/ 154.5	5011/ 154.5	5011/ 154.5	5011/ 154.5
	Pl-1	Pl-6	Pl-5	Kfs-2	Pl-1	Pl-2	Kfs-6	Kfs-7	Pl-14	Pl-15
SiO ₂	67.17	66.53	68.52	65.23	68.72	65.63	64.26	61.32	65.99	66.21
Al ₂ O ₃	19.67	19.61	19.39	18.23	20.13	20.89	18.17	19.09	20.08	19.73
FeO	0.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	0.81	-	-	-	0.60	2.11	0.66	0.54	1.88	0.94
Na ₂ O	11.60	12.22	12.11	0.51	11.56	10.86	15.80	14.42	10.34	10.81
K ₂ O	-	-	-	14.70	-	-	-	-	-	-
BaO								3.51		
Сумма [Total]	99.61	98.36	100.02	98.67	101.01	99.49	98.89	98.88	99.01	97.69
Si	2.95	2.94	2.98	3.06	2.98	2.89	3.00		2.93	2.97
Al	1.02	1.02	0.99	1.01	1.03	1.08	1.00		1.09	1.04
Fe ³⁺	0.01	-	-	-	-	-	-		-	-
Ca	0.04	-	-	-	0.03	0.10	-		0.09	0.05
Na	0.99	1.04	1.02	0.05	0.97	0.93	0.06		0.89	0.94
K	-	-	-	0.88	-	-	0.94		-	-
Ort	-	-	-	0.95	-	-	0.94		-	-
Ab	0.96	1.00	1.00	0.05	0.97	0.90	0.06		0.91	0.95
An	0.04	-	-	-	0.03	0.10	-		0.09	0.05

Гранит-порфиры, слагающие краевые части Атаманского массива, розовато-серые с порфировой текстурой. Фенокристы составляют 30–50 мас. %. В их составе преобладает микроклин (50–60 мас. %), также присутствует кварц (25 мас. %) и альбит (25 мас. %). Основная масса породы мелкозернистая, состоит из кварца, альбита и биотита. Структура аплитовая, реже микропегматитовая. В гранитах встречаются небольшие (до 1.5 м по керну скважин) ксенолиты вмещающих пород.

Характерной особенностью является очень высокая железистость железо-магнезиальных силикатов в гранитах. Биотит имеет зеленовато-бурую окраску, высокую железистость ($X_{Fe} = 0.88–0.95$) и представлен преимущественно аннитом (табл. 2). Зеленая роговая обманка с характерным голубоватым оттенком отвечает по составу гастингситу [22] с очень высокой железистостью ($X_{Fe} = 0.92–0.96$) и содержанием K₂O, превышающем Na₂O (табл. 3). В кристаллохимической формуле калий (0.34–0.40 ф. е.) преобладает над натрием в позиции А.

Табл. 2. Составы биотитов из гранитов Атаманского массива
[Table 2. Biotite from the Atamansky massif granites composition]

Скв./глуб. [Drill hole/depth]	594/ 121	1544/ 198.6	1544/ 198.6	1544/ 198.6	1544/ 210	1544/ 210	1544/ 210	1544/ 210	5011/ 154.5	5011/ 154.5	5011/ 154.5	5011/ 154.5	5011/ 154.5	5011/ 154.5
	Bt-1	Bt-2	Bt-3	Bt-12	Bt-1	Bt-2	Bt-3	Bt-11	Bt-8	Bt-9	Bt-10	Bt-11	Bt-19	Bt-22
SiO ₂	36.38	34.55	35.32	34.34	34.54	35.16	35.58	34.99	34.50	33.79	34.26	33.51	35.03	34.76
TiO ₂	2.12	2.65	2.43	2.98	1.37	1.49	1.79	1.49	2.42	2.54	1.70	1.32	2.07	1.76
Al ₂ O ₃	17.28	14.37	15.23	16.15	15.58	16.28	16.04	15.68	16.02	17.06	16.07	17.04	16.50	16.25
FeO	25.87	34.15	33.48	31.58	34.36	33.46	31.21	32.85	31.86	33.00	33.25	33.96	33.43	32.75
MnO	0.84	-	-	-	-	-	0.37	0.59	0.52	0.64	0.46	0.39	0.40	0.49
MgO	4.09	1.72	1.95	2.10	2.23	2.47	1.83	2.41	1.54	1.40	1.04	1.25	1.11	1.10
Na ₂ O	-	-	-	-	0.56	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	9.19	9.03	9.16	8.95	8.30	8.84	8.57	8.35	9.33	8.91	9.06	9.04	9.10	8.99
Сумма [Total]	95.77	96.47	97.57	96.10	96.94	97.70	95.39	96.36	96.19	97.34	95.84	96.51	97.64	96.10
Si	2.96	2.88	2.89	2.85	2.83	2.86	2.97	2.89	2.86	2.78	2.86	2.77	2.87	2.89
Ti	0.13	0.17	0.15	0.19	0.08	0.09	0.11	0.09	0.15	0.16	0.11	0.08	0.13	0.11
Al ^{IV}	1.04	1.12	1.11	1.15	1.17	1.14	1.03	1.11	1.14	1.22	1.14	1.23	1.13	1.11
Al ^{VI}	0.61	0.29	0.36	0.42	0.34	0.42	0.55	0.42	0.43	0.43	0.45	0.44	0.47	0.49
Fe ³⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe ²⁺	1.75	2.37	2.29	2.19	2.35	2.27	2.17	2.27	2.21	2.26	2.32	2.35	2.29	2.28
Mn	0.06	-	-	-	-	-	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
Mg	0.50	0.21	0.24	0.26	0.27	0.30	0.23	0.30	0.19	0.17	0.13	0.15	0.14	0.14
Na	-	-	-	-	0.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K	0.95	0.96	0.96	0.95	0.87	0.92	0.91	0.88	0.99	0.93	0.97	0.95	0.95	0.95
X _{Fe}	0.79	0.92	0.91	0.89	0.90	0.88	0.91	0.89	0.92	0.93	0.95	0.94	0.94	0.94

Табл. 3. Составы роговых обманок из гранитов Атаманского массива
[Table 3. Hornblende from the Atamansky massif granites composition]

Скв./глубина [Drill hole/depth]	5011/ 154.5	5011/ 154.5	5011/ 154.5	5011/ 154.5	5011/ 154.5	5011/ 154.5	5011/ 154.5	5011/ 154.5	5011/ 154.5
	Hb-3	Hb-4	Hb-12	Hb-13	Hb-16	Hb-17	Hb-18	Hb-20	Hb-21
SiO ₂	38.79	38.74	39.69	38.61	39.03	38.55	39.33	38.99	39.47
TiO ₂	1.16	1.26	0.97	0.66	0.94	1.15	1.05	1.10	1.03
Al ₂ O ₃	10.30	10.47	10.24	10.60	10.45	10.82	10.22	11.10	10.58
FeO	32.36	33.09	32.36	32.73	31.32	32.96	33.13	32.86	32.51
MnO	0.50	0.85	0.80	0.53	0.63	0.58	0.69	0.66	0.53
MgO	1.31	0.76	0.89	1.03	1.02	0.70	0.89	0.89	1.08
CaO	11.10	11.21	10.83	10.60	10.70	10.95	10.96	10.94	10.88
Na ₂ O	1.22	1.26	1.63	1.44	1.41	1.17	1.71	1.31	1.51
K ₂ O	1.79	1.72	1.67	1.73	1.92	1.83	1.76	1.73	1.68
Сумма [Total]	98.53	99.36	99.08	97.93	97.42	98.80	99.74	99.58	99.27
Si	6.21	6.18	6.33	6.20	6.32	6.17	6.26	6.17	6.26
Ti	0.14	0.15	0.12	0.08	0.11	0.14	0.13	0.13	0.12
Al ^{IV}	1.65	1.67	1.55	1.72	1.57	1.69	1.61	1.70	1.62
ΣT	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al ^{VI}	0.29	0.30	0.37	0.29	0.42	0.35	0.31	0.37	0.36
Fe ³⁺	0.80	0.80	0.64	0.97	0.58	0.85	0.70	0.88	0.74
Fe ²⁺	3.52	3.60	3.67	3.42	3.66	3.55	3.70	3.45	3.56
Mn	0.07	0.11	0.11	0.07	0.09	0.08	0.09	0.09	0.07
Mg	0.31	0.18	0.21	0.25	0.25	0.17	0.21	0.21	0.26
ΣC	4.99	4.99	5.00	5.00	5.00	5.00	5.01	5.00	4.99
Ca	1.90	1.91	1.85	1.82	1.86	1.88	1.87	1.85	1.85
Na	0.10	0.09	0.15	0.18	0.14	0.12	0.53	0.40	0.46
ΣB	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Na	0.28	0.30	0.35	0.27	0.30	0.24	0.40	0.25	0.31
K	0.37	0.35	0.34	0.35	0.40	0.37	0.36	0.35	0.34
ΣA	0.65	0.65	0.69	0.62	0.70	0.61	0.76	0.60	0.65
X _{Fe}	0.92	0.95	0.95	0.93	0.94	0.96	0.95	0.94	0.93

Геохимия

Граниты Атаманского массива высококремнистые (SiO₂ от 73 до 79 мас. %), породы характеризуются довольно выдержанным составом, высокими содержаниями щелочей (K₂O + Na₂O = 7.4–9.0 мас. %) с преобладанием калия над натрием (K₂O/Na₂O = 1.4–3.4). Они имеют низкие концентрации CaO (0.20–1.71 мас. %) и MgO (0.09–0.44 мас. %), обогащены TiO₂ (от 0.11 до 0.44 мас. %). (табл. 4, рис. 4). Важной отличительной особенностью гранитов является очень высокая железистость (X_{Fe} от 0.76 до 0.93) пород. По содержанию Al₂O₃ граниты являются метаглиноземистыми (A/CNK от 0.81 до 1.02) (рис. 5) с повышенными значениями отношения Fe₂O₃/TiO₂ от 10.3 до 27.7 (рис. 4).

По геохимическим характеристикам граниты выделяются низкими концентрациями Sr (13–91 ppm), высокими Rb (114–251 ppm), Ba (до 1280 ppm), Ga (13–21 ppm) и повышенными – элементов группы железа (Cr, Ni и V). Из высокозарядных элементов фиксируются повышенные содержания Nb (15–30 ppm), Ta (1.0–2.4 ppm), Y (32–73 ppm), Th (11–31 ppm) и умеренные содержания Zr (до 400 ppm) (рис. 4).

Редкоземельные элементы (REE) характеризуются умеренными содержаниями (ΣREE до 400 ppm), обогащенными спектрами лёгких редких земель (LREE) (La_N/Sm_N = 2.7–5.6), умеренно фракционированными тяжёлых (HREE) (Gd_N/Yb_N = 1.5–2.2) и глубокими отрицательными Eu аномалиями (Eu/Eu* = 0.04–0.61)

(табл. 4, рис. 6). Величины Eu/Eu* имеют прямую корреляцию с концентрациями Sr, указывая на возможный вклад плагиоклаза в неоднородность геохимических характеристик гранитов.

U-Pb геохронология по цирконам

Нами были выполнены определения возраста циркона на ионном микрозонде SHRIMP-II для проб гранитов из центральной и краевой частей Атаманского массива в скважине 1544, глубина 209 м и скважине 5011, глубина 154.5 м (рис. 2).

Циркон в пробе 1544/209 представлен идиоморфными и субидиоморфными призматическими зёрнами коричневой и светло коричневой окраски, размером 200–300 мкм по длинной оси и шириной 50–150 мкм (рис. 7). Ребра четкие, грани матовые. В зернах наблюдаются концентрические и радиальные трещины, вероятнее всего образовавшиеся вследствие метамиктизации. Присутствуют твердофазные включения. В катодоллюминесценции видна структура роста – тонкая концентрическая осцилляторная, незональные участки (возможный результат рекристаллизации) наблюдаются на вершинах пирамид довольно редко. Явных унаследованных ядер не выявлено.

Структурные и морфологические признаки указывают на магматическую природу циркона и практически полное отсутствие значительных наложенных событий.

Табл. 4. Составы гранитов атаманского массива
[Table 4. Atamansky massif granites composition]

Скв./глубина [Drill hole/depth]	1539/ 177.0	1539/ 185	1539/ 191.7	1542/ 214	1542/ 217.0	1544/ 198.6	1544/ 209	1544/ 210.0	5017/ 129.0	5017/ 134.0	5017/ 139.0	5017/ 161.0	596/ 165.5	2281/ 385.7	2281/ 332.8	2281/ 440.6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
SiO ₂	74.60	74.87	76.11	75.63	75.32	75.03	74.66	74.64	75.77	76.61	76.51	75.58	74.07	79.02	77.37	76.53
TiO ₂	0.44	0.29	0.24	0.12	0.15	0.28	0.34	0.27	0.11	0.18	0.14	0.19	0.35	0.08	0.09	0.13
Al ₂ O ₃	10.14	11.50	10.63	11.83	12.03	10.79	10.36	10.81	11.48	10.59	10.73	11.29	10.40	10.67	11.46	12.12
Fe ₂ O _{3tot}	4.52	3.00	3.33	2.44	2.47	3.08	4.20	3.65	3.05	2.50	2.41	3.02	4.76	1.14	1.84	1.51
MgO	0.44	0.18	1.27	0.09	0.10	0.13	0.35	0.13	0.14	0.25	0.17	0.24	0.28	0.12	0.12	0.16
MnO	-	0.03	0.01	0.02	0.04	0.04	0.05	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.04	-	0.01	0.02
CaO	0.28	0.95	-	0.67	0.61	1.25	1.71	1.20	0.20	0.58	0.60	0.93	0.91	0.42	0.42	0.52
Na ₂ O	2.04	2.91	3.23	3.42	3.46	2.98	2.86	2.61	2.59	2.22	2.21	3.11	2.62	2.98	3.45	3.39
K ₂ O	6.92	5.04	4.74	5.48	5.53	5.48	4.58	5.97	6.32	6.33	6.80	4.90	5.42	5.21	4.76	5.21
P ₂ O ₅	0.06	0.03	0.03	-	-	0.03	0.07	0.04	-	0.02	0.02	0.03	0.06	-	-	-
ППП [LOI]	0.39	0.91	0.18	0.20	0.22	0.68	0.60	0.24	0.23	0.42	0.21	0.38	0.55	0.19	0.23	0.27
Сумма [Total]	99.99	99.97	99.91	99.95	99.97	99.87	99.85	99.74	99.93	99.86	99.86	99.99	99.68	99.85	99.86	99.89
ASI	0.73	0.87	0.89	0.83	0.84	0.75	0.77	0.74	0.83	0.77	0.74	0.85	0.78	0.83	0.89	0.89
X _{Mg}	0.16	0.11	0.43	0.07	0.08	0.08	0.14	0.07	0.08	0.16	0.12	0.14	0.10	0.17	0.11	0.17
K ₂ O/Na ₂ O	3.38	1.74	1.47	1.60	1.60	1.84	1.60	2.28	2.44	2.85	3.08	1.57	2.07	1.75	1.38	1.54
K ₂ O+Na ₂ O	8.96	7.95	7.97	8.91	8.99	8.46	7.44	8.59	8.91	8.55	9.01	8.01	8.04	8.19	8.21	8.60
A/CNK	0.89	0.96	1.02	0.92	0.94	0.82	0.81	0.83	1.00	0.92	0.89	0.93	0.88	0.94	0.99	1.00
Sc	5.92	5.79	5.19	4.92	5.87	4.96		4.77	2.06	3.7	2.68	6.61	8.01		4.5	5.4
V	30.2	38.4	32.9	29.3	31.9	26.2		27.7	21.1	27.8	29.5	33.4	34.8		16.1	13.6
Cr	56.5	68	55.3	71.6	54	53.4		59.8	38.4	56.7	72.9	66.5	85.4		18.8	15.7
Ni	10.4	5.47	4.55	6.34	4.96	5.36		5.3	3.87	4.23	6.19	4.51	7.78		3.1	2.7
Ga	14.3	16.6	15	20.4	20.2	15.6		16.3	20.8	17.8	19.3	21.3	20.1		12.5	13.3
Rb	114	134	125	251	251	145		146	182	168	172	188	154		97.5	121
Sr	36.8	65.3	39.6	12.9	14.1	65.7		62.2	28.5	37.7	35.9	59.7	91.1		25.7	24.5
Y	42.9	38.8	39.2	70.3	73.3	32.2		31.9	38.8	41.3	31.8	66.6	52.6		42.6	50.2
Zr	316	333	223	262	306	229		225	86.1	225	197	406	395		119	176
Nb	23.9	19.6	17	25.9	24.2	16.5		14.6	14.9	17.4	15	29.6	24.9		14.2	14.6
Mo	1.74	3.54	2.13	2	2.1	4.26		2.3	1.41	1.56	1.98	2.03	2.46		1.8	1.1

Продолжение Табл. 4
[Continued Table 4]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Ba	1040	1160	481	61.6	75.8	767		1090	242	754	769	704	1280		643	726
La	31.2	71.9	63.4	78.5	83.3	42.6		53.7	72.4	60.7	47.3	90.6	66.7		34.8	57.1
Ce	58	133	119	136	164	75.5		98.3	116	117	84	168	129		76.3	122
Pr	6.81	13.7	12.4	15.9	16.5	8.42		10.7	13.7	12.9	9.05	19	14.40		10.5	16.7
Nd	23.3	45.3	42.3	54	55.1	29.8		37.6	45	45	30.4	65.5	53.8		38.5	59.5
Sm	4.83	8.28	7.27	10.9	10.2	6.01		6.51	8.16	8.29	6.09	12.3	10.8		8.2	12.0
Eu	1.02	0.97	0.58	0.25	0.12	0.81		0.97	0.44	0.76	0.73	1.05	1.6		0.50	0.75
Gd	5.69	6.92	7.15	10.9	9.99	5.45		6.24	7.58	7.61	5.19	12.4	10.4		8.0	10.6
Tb	1.12	1.19	1.08	1.8	1.74	0.89		1	1.19	1.3	0.89	1.93	1.68		1.2	1.6
Dy	7.69	6.92	7.01	11.4	10.8	5.76		5.66	7.36	7.46	5.42	11.2	10.10		7.9	9.3
Ho	1.55	1.33	1.37	2.42	2.44	1.15		1.17	1.54	1.56	1.1	2.35	1.97		1.6	1.8
Er	4.53	4.05	3.81	7.36	7.66	3.6		3.28	4.7	4.26	3.58	7.29	5.72		4.9	5.3
Tm	0.7	0.65	0.63	1.09	1.16	0.53		0.49	0.78	0.71	0.53	1.04	0.89		0.66	0.71
Yb	3.75	4.03	3.95	6.64	7.17	3.2		3.26	4.96	4.16	3.33	6.43	5.33		4.5	4.8
Lu	0.51	0.52	0.52	0.93	0.99	0.44		0.37	0.68	0.59	0.48	0.91	0.68		0.65	0.70
Hf	8.44	8.72	6.99	8.93	10.6	6.01		5.81	4.06	6.47	5.76	11.7	11.30		4.9	6.3
Ta	1.48	1.55	1.45	2.38	2.4	1.23		0.97	1.39	1.29	1.18	2.25	1.68		1.1	1.3
Pb	16.2	23.8	12.7	32.5	20.3	41.9		29.9	14.7	14.3	12.2	21	16.2		12.8	11.8
Th	13.9	17.8	17.7	31.2	45.9	12.4		10.8	24.4	15.8	12	25.4	17.8		20.1	22.8
U	2.3	3.36	3.6	5.6	8.1	2.7		2.7	1.1	1.5	3.4	3.7	3.8		3.5	4.7
ΣREE	151	299	270	338	371	184		229	284	272	198	400	313		198	303
Eu/Eu*	0.59	0.39	0.25	0.07	0.04	0.43		0.47	0.17	0.29	0.40	0.26	0.46		0.19	0.20
(Gd/Yb) _n	1.26	1.42	1.50	1.36	1.15	1.41		1.58	1.26	1.51	1.29	1.60	1.61		1.47	1.83
(La/Yb) _n	5.97	12.80	11.51	8.48	8.33	9.55		11.82	10.47	10.47	10.19	10.11	8.98		5.55	8.53
(La/Sm) _n	4.17	5.61	5.63	4.65	5.27	4.58		5.33	5.73	4.73	5.01	4.76	3.99		2.74	3.07
Rb/Ba	0.11	1.12	0.26	4.07	3.31	0.19		0.14	0.75	0.22	0.22	0.27	0.12		0.15	0.17
Ba/Sr	28.26	17.76	12.15	4.78	5.38	11.67		17.52	8.49	20.00	21.42	11.79	14.05		25.02	29.63

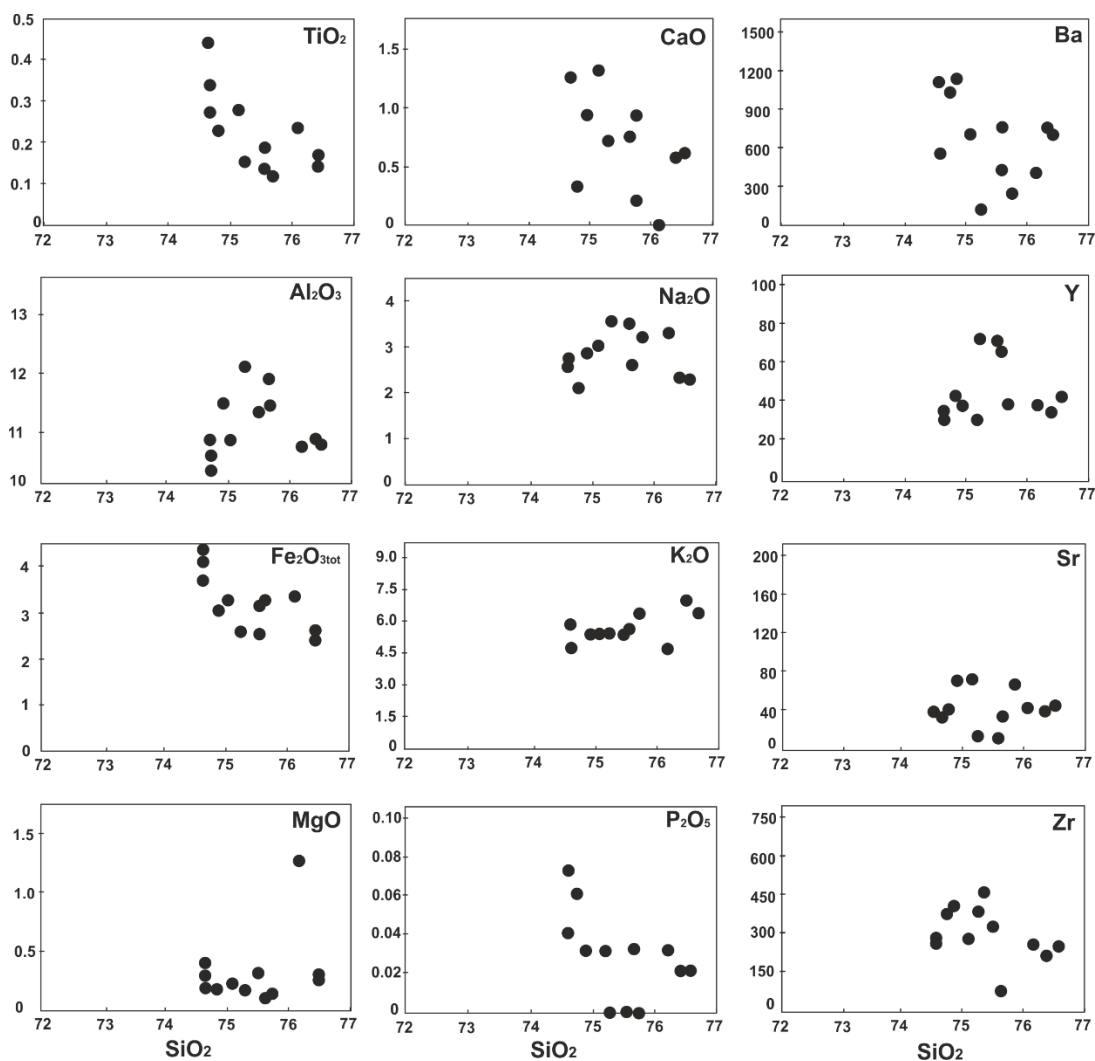


Рис. 4. Диаграммы распределения петрогенных оксидов и редких элементов относительно SiO₂ в гранитах атаманского комплекса.

[Fig. 4. Plots of major and trace elements versus SiO₂ for the Atamansky granites.]

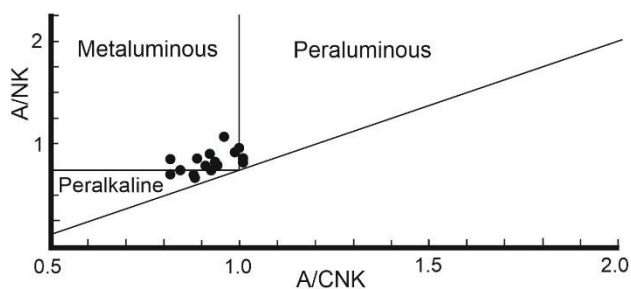


Рис. 5. Составы гранитов Атаманского комплекса на диаграмме A/NK-A/CNK.

[Fig. 5. A/NK (molar Al₂O₃/(Na₂O + K₂O)) versus A/CNK (molar Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O)) diagram for granites.]

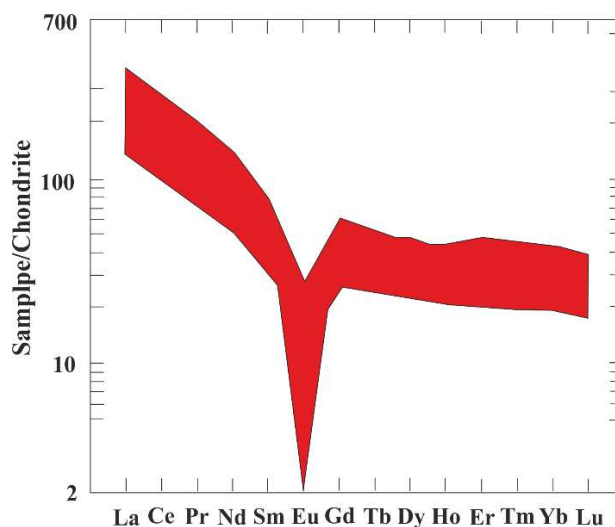


Рис. 6. Распределение редкоземельных элементов в гранитах атаманского комплекса.

[Fig. 6. Chondrite-normalized REE patterns of Atamansky granites (data are for bulk-rock samples).]

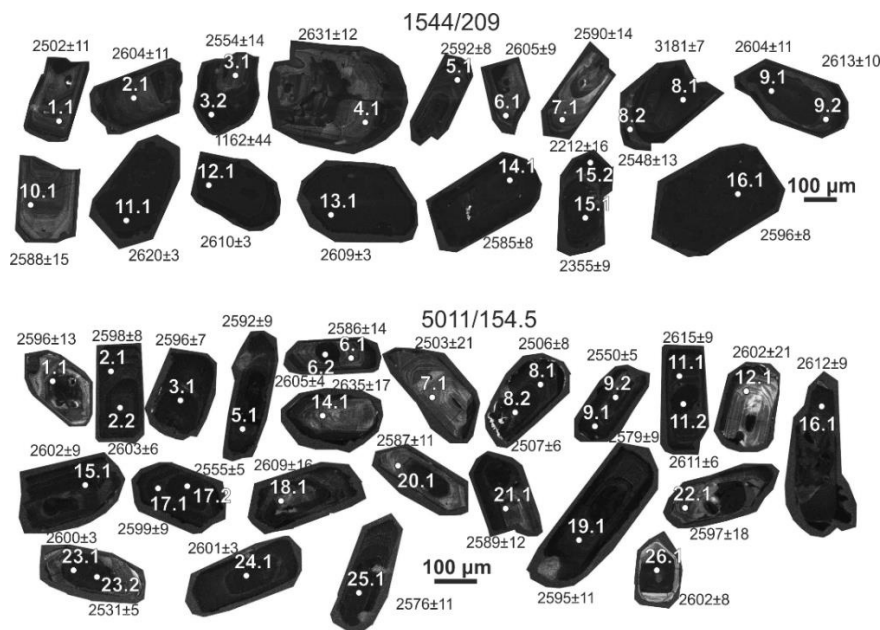


Рис. 7. Расположение точек определения возраста на катодолуминесцентных снимках цирконов из гранитов Атаманского массива. Номера аналитических точек соответствуют указанным в табл. 5. [Fig. 7. Cathodoluminescence images of zircon grains from Atamansky granite complex. Numbers of analytical points correspond to those in Table 5.]

В образце 1544/209 было выполнено 20 анализов в 15 зернах, анализировались и центральные, и краевые (незональные) части (рис. 7). Все результаты на графике с конкордией аппроксимируются единой линией регрессии (рис. 8). Невысокая девиация точек от линии регрессии (СКВО = 1.7) предполагает минимальное воздействие докембрийских процессов на данные цирконы. Возраст по верхнему пересечению с конкордией

(12 анализов) составляет 2613 ± 4 млн лет и совпадает со средневзвешенным возрастом по $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$: 2612 ± 6 млн лет (10 анализов, СКВО = 2.5). Значения, полученные по нижним пересечениям дискордии, учитывая сложную историю пород, вероятнее всего не имеют геологического смысла. Только в одном зерне циркона из гранитов сохранилось унаследованное ядро, возраст которого 3181 млн лет (проба 1544/209 рис. 7, табл. 5).

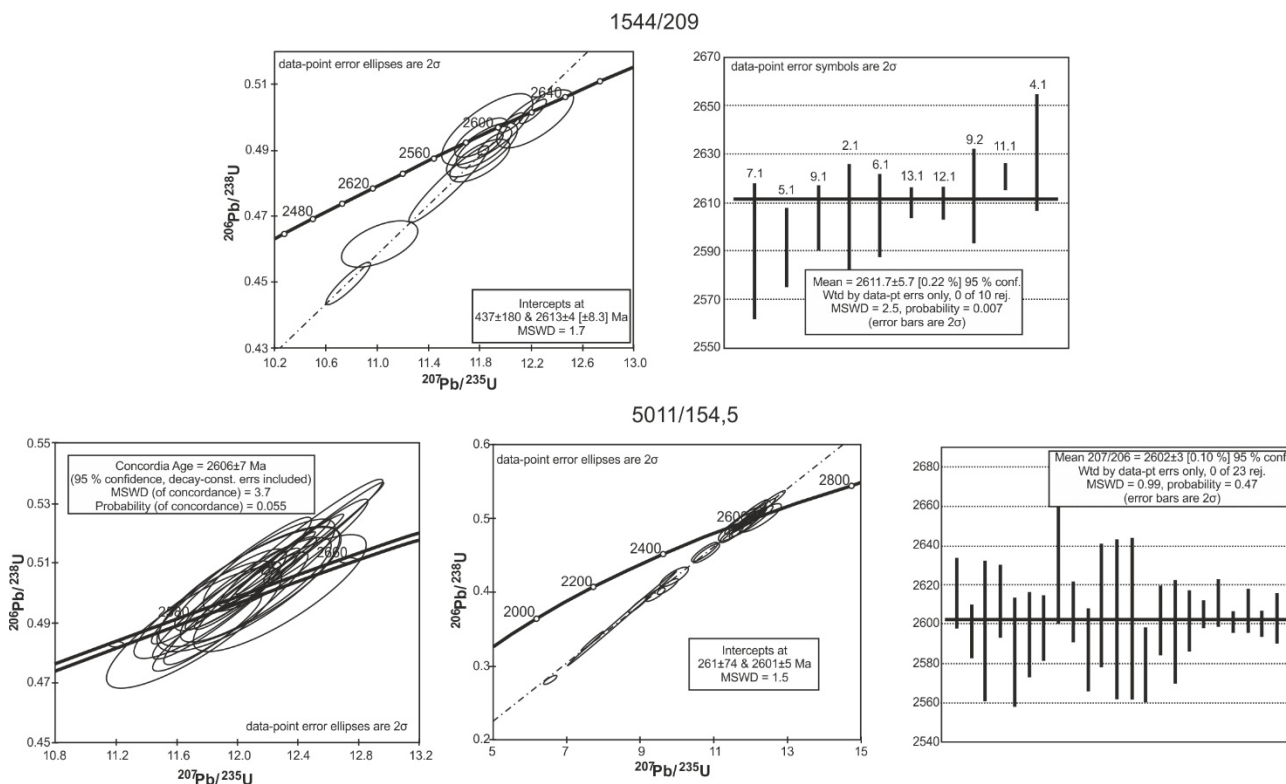


Рис. 8. Результаты U-Pb датирования цирконов из гранитов Атаманского массива методом SIMS. [Fig. 8. The results of U-Pb SIMS analyses of zircons from the Atamansky Massif granites.]

Табл. 5. Результаты U-Pb изотопного датирования циркона из гранитов Атаманского массива
 [Table 5. The results of U-Pb isotope dating of zircon from the Atamansky granite]

Точка [Spot]	% $^{206}\text{Pb}_c$	мкг/г U [ppm U]	мкг/г Th [ppm Th]	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	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 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ [Total $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$]	%	Общий $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ [Total $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$]	%	(1) $^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	%	(1) $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	%	Корр. ошиб. [Err. corr.]		
Образец 1544/209 [Sample 1544/209]																			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3.2	0.83	2914	2012	0.71	82.3	207	1	1162	44	46	30.660	0.4	0.0786	2.2	0.354	2.2	0.0326	0.4	.193
15.2	0.22	1386	888	0.66	127	651	7	2212	16	24	9.404	1.1	0.1388	0.9	2.035	1.4	0.1063	1.1	.758
15.1	0.05	596	663	1.15	118	1333	4	2355	9	77	4.353	0.4	0.1508	0.5	4.777	0.6	0.2297	0.4	.581
1.1	0.11	144	81	0.58	39.4	1775	11	2502	11	41	3.155	0.7	0.1645	0.7	7.189	1.0	0.3170	0.7	.709
8.2	0.10	105	34	0.33	35.1	2121	12	2548	13	20	2.566	0.7	0.1690	0.8	9.080	1.0	0.3897	0.7	.646
3.1	0.40	147	103	0.72	37.7	1674	9	2554	14	53	3.372	0.6	0.1696	0.8	6.935	1.0	0.2965	0.6	.599
14.1	0.00	375	270	0.74	139	2317	9	2585	8	12	2.312	0.5	0.1728	0.5	10.301	0.6	0.4324	0.5	.695
10.1	0.05	130	74	0.59	51.4	2446	12	2588	15	6	2.167	0.6	0.1731	0.9	11.020	1.1	0.4615	0.6	.557
7.1	0.17	61	31	0.53	25.9	2597	19	2590	14	0	2.016	0.9	0.1733	0.8	11.860	1.2	0.4962	0.9	.734
5.1	0.13	184	112	0.63	78.2	2586	10	2592	8	0	2.026	0.5	0.1735	0.5	11.809	0.7	0.4937	0.5	.704
16.1	0.02	864	574	0.69	334	2393	12	2596	5	8	2.225	0.6	0.1739	0.3	10.777	0.7	0.4495	0.6	.908
9.1	0.04	369	309	0.86	152	2525	21	2604	7	3	2.085	1.0	0.1748	0.4	11.560	1.1	0.4796	1.0	.933
2.1	0.12	105	50	0.49	44.1	2571	14	2604	11	1	2.040	0.7	0.1748	0.7	11.820	0.9	0.4902	0.7	.719
6.1	0.06	147	88	0.61	62.2	2574	11	2605	9	1	2.037	0.5	0.1749	0.5	11.836	0.7	0.4909	0.5	.712
13.1	0.01	1445	731	0.52	610	2578	6	2609	3	1	2.034	0.3	0.1754	0.2	11.887	0.3	0.4917	0.3	.798
12.1	0.02	2006	1364	0.70	859	2606	6	2610	3	0	2.007	0.3	0.1754	0.2	12.052	0.3	0.4983	0.3	.814
9.2	0.08	173	84	0.50	72.3	2557	11	2613	10	2	2.054	0.5	0.1757	0.6	11.797	0.8	0.4869	0.5	.675
11.1	0.00	1901	1584	0.86	820	2621	6	2620	3	0	1.993	0.3	0.1765	0.2	12.211	0.4	0.5018	0.3	.851
4.1	0.03	76	42	0.57	32.8	2612	15	2631	12	1	2.001	0.7	0.1776	0.7	12.230	1.0	0.4996	0.7	.713
8.1	0.05	115	101	0.90	61.7	3124	14	3181	7	2	1.604	0.6	0.2493	0.5	21.440	0.7	0.6236	0.6	.787
Образец 5011/154.5[Sample 5011/154.5]																			
21.1	--	171	119	66.6	0.72	2408	23	2589	12	+8	2	1.1	0.173	0.7	10.813	1.3	0.4529	1.1	0.9
5.1	0.02	299	145	105	0.50	2203	20	2592	9	+1	2	1.1	0.174	0.5	9.748	1.2	0.4075	1.1	0.9
17.1	--	269	133	111	0.51	2521	20	2599	9	+4	2	1.0	0.174	0.6	11.498	1.1	0.4785	1.0	0.9
11.1	--	246	122	103	0.51	2560	21	2615	9	+3	2	1.0	0.176	0.6	11.828	1.2	0.4875	1.0	0.9

Продолжение Табл. 5
[Continued Table 5]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3.1	--	440	239	185	0.56	2563	18	2596	7	+2	2	0.9	0.174	0.4	11.712	1.0	0.4883	0.9	0.9
22.1	0.19	95	51	39.7	0.56	2564	36	2597	18	+2	2	1.7	0.174	1.1	11.718	2.0	0.4884	1.7	0.8
16.1	--	249	115	106	0.48	2586	35	2612	9	+1	2	1.6	0.176	0.6	11.953	1.7	0.4937	1.6	0.9
6.1	0.00	107	62	45.2	0.60	2588	29	2586	14	-0	2	1.4	0.173	0.8	11.777	1.6	0.4940	1.4	0.8
19.1	--	218	101	92.7	0.48	2588	23	2595	11	+0	2	1.1	0.174	0.6	11.840	1.2	0.4940	1.1	0.9
2.1	--	314	147	134	0.48	2608	20	2598	8	-0	2	0.9	0.174	0.5	11.974	1.1	0.4986	0.9	0.9
14.1	--	74	42	31.6	0.59	2614	34	2635	17	+1	2	1.6	0.178	1.1	12.277	1.9	0.5001	1.6	0.8
8.1	0.00	354	170	152	0.50	2617	20	2606	8	-1	2	0.9	0.175	0.5	12.084	1.0	0.5009	0.9	0.9
20.1	0.03	183	104	78.8	0.59	2618	24	2587	11	-1	2	1.1	0.173	0.6	11.951	1.3	0.5009	1.1	0.9
18.1	--	97	57	41.7	0.61	2619	30	2609	16	-0	2	1.4	0.175	0.9	12.119	1.7	0.5012	1.4	0.8
12.1	0.17	69	40	29.6	0.60	2621	35	2602	21	-1	2	1.6	0.175	1.2	12.075	2.1	0.5016	1.6	0.8
7.1	--	69	42	29.8	0.63	2621	35	2603	21	-1	2	1.6	0.175	1.2	12.082	2.0	0.5017	1.6	0.8
9.1	0.04	239	119	104	0.51	2631	37	2579	9	-2	2	1.7	0.172	0.6	11.967	1.8	0.5039	1.7	0.9
15.1	--	282	214	123	0.79	2644	21	2602	9	-2	2	1.0	0.175	0.5	12.205	1.1	0.5071	1.0	0.9
1.1	0.11	139	115	60.9	0.86	2654	27	2596	13	-3	2	1.2	0.174	0.8	12.214	1.5	0.5093	1.2	0.8
c-26.1	0.01	143	126	62.9	0.91	2667	44	2602	±8	-3	2	2.0	0.175	0.5	12.34	2.1	0.513	2.0	1.0
c-6.2	0.01	948	805	418	0.88	2668	24	2605	±4	-3	2	1.1	0.175	0.2	12.36	1.1	0.513	1.1	1.0
c-11.2	0.01	1511	695	666	0.48	2672	31	2611	±6	-3	2	1.4	0.175	0.4	12.43	1.5	0.514	1.4	1.0
c-24.1	--	1332	943	585	0.73	2660	24	2601	±3	-3	2	1.1	0.174	0.2	12.29	1.1	0.511	1.1	1.0
c-8.2	0.01	334	191	146	0.59	2652	49	2607	±6	-2	2	2.2	0.175	0.3	12.28	2.3	0.509	2.2	1.0
c-23.1	0.01	995	878	433	0.91	2643	24	2600	±3	-2	2	1.1	0.174	0.2	12.19	1.1	0.507	1.1	1.0
c-2.2	--	250	186	107	0.77	2614	27	2603	±6	-0	2	1.2	0.175	0.4	12.04	1.3	0.500	1.2	1.0
c-25.1	0.07	420	304	164	0.75	2414	23	2576	±1	+7	2	1.2	0.172	0.7	10.76	1.3	0.454	1.2	0.9
c-17.2	0.06	394	196	130	0.51	2091	21	2555	±5	+2	3	1.2	0.170	0.3	8.96	1.2	0.383	1.2	1.0
c-9.2	0.01	464	325	145	0.72	2005	12	2550	±5	+2	3	7.1	0.169	0.3	8.51	7.2	0.365	7.1	1.0
c-23.2	0.11	647	590	185	0.94	1856	26	2531	±5	+3	3	1.6	0.167	0.3	7.70	1.7	0.334	1.6	1.0

Примечания: ошибки 1σ. Pb_c и Pb* - первичный и радиогенный свинец, соответственно. Ошибка в стандартной калибровке 0.39 %. (1) Первичный Pb скорректирован на измеренный ²⁰⁴Pb. D, % - процент дискордантности.

[Footnotes: Error are 1σ. Pb_c and Pb* indicate the common and radiogenic portions, respectively. Error in Standard calibration was 0.39 %. (1) Common Pb corrected using measured ²⁰⁴Pb. D, - % Discordant]

Циркон в пробе 5011/154.5 представлен светло-коричневыми, серыми полупрозрачными призматическими и субидiomорфными зёрнами размером 150–200 мкм (рис. 6). Часто встречаются включения минералов, а также расплавы и флюидные включения. В катодоллюминесценции хорошо выражена концентрическая осцилляционная зональность. Некоторые зёрна имеют более темные внешние каймы, скорее всего, обусловленные обогащенными ураном поздними зонами роста. Это характерная особенность циркона из кислых изверженных пород. В цирконе отмечаются слабо зональные и незональные центральные части зёрен. Такая картина может наблюдаться, если сохраняются унаследованные ядра и магматические оболочки, или если циркон имел сложную историю роста, (например, [23]). Такая структура циркона предполагает длительный рост с импульсом(-ами) повышения температуры и частичное растворение ранее кристаллизованного циркона. Все описанные особенности свидетельствуют о магматической природе циркона из гранитов атаманского массива.

Было выполнено 20 анализов в зональных доменах циркона и 10 анализов во внутренних незональных частях (рис. 7). На диаграмме с конкордией (рис. 8) все результаты аппроксимируются единой линией регрессии с преимущественно конкордантными значениями возрастов. Значительных различий между незональными внутренними частями кристаллов и внешними зональными каймами не выявлено: средневзвешенные значения $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возрастов из них составляют 2600 ± 6 (N = 16, СКВО = 1.16) и 2603 ± 3 (N = 7, СКВО = 0.59) млн лет соответственно.

Центральные части, обогащенные ураном, дают несколько более точные результаты. Верхнее пересечение линии регрессии с конкордией через все аналитические точки дает возраст 2601 ± 5 млн лет (СКВО = 1.5, рис. 7), тогда как конкордантный возраст и зональных, и незональных частей равен 2606 ± 7 млн лет (СКВО = 3.7 обусловлен слабой обратной дискордантностью, рис. 7). Средневзвешенный $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст всех конкордантных значений составляет 2602 ± 3 млн лет (N = 23, СКВО = 0.99, рис. 7). Учитывая возможность сложной магматической эволюции породы, конкордантный возраст 2606 ± 7 млн лет следует рассматривать как возраст кристаллизации.

Изотопная систематика

Изотопный состав Hf в цирконах из гранитов Атаманского массива (обр. 1544/209) определялся в тех же точках, что и U-Pb изотопный возраст. В отличие от U-Pb изотопной системы, которая во всех зёрнах циркона дает неразличимо близкие возрасты 2610 ± 10 млн лет, Lu-Hf изотопная система в тех же зёрнах демонстрирует широкие вариации первичного изотопного состава гафния ($\epsilon\text{Hf}_{(2610)}$ от +0.8 до -10.8) (табл. 6, рис. 9). Модельные возрасты $T_{\text{Hf}}(\text{DM})^{\circ}$, рассчитанные по двухстадийной модели, являются палеоархейскими – от

3311 до 3577 млн лет, за исключением двух значений – мезоархейского (3119 млн лет) и эоархейского (3844 млн лет). Унаследованное ядро циркона с возрастом 3.18 млрд лет также характеризуется отрицательным значением ($\epsilon\text{Hf}_{(2610)} = -2.5$) и палеоархейским модельным возрастом ($T_{\text{Hf}}(\text{DM})^{\circ} = 3682$ млн лет).

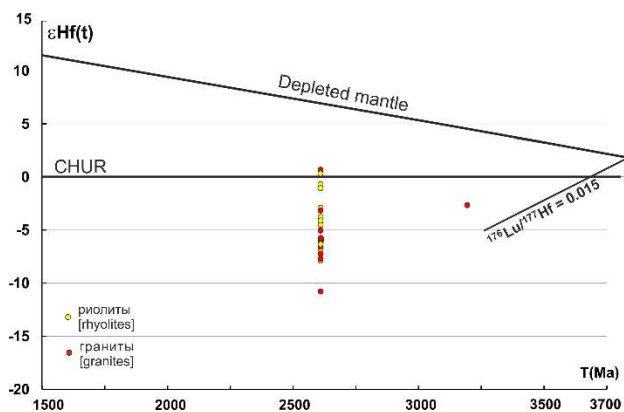


Рис. 9. Диаграмма $\epsilon\text{Hf}(t) - T$ для циркона из гранитов Атаманского массива.

[Fig. 9. Plots of $\epsilon\text{Hf}(t)$ values versus zircon ages for zircon grains from the Atamansky Massif granites.]

Граниты характеризуются резко отрицательными значениями $\epsilon\text{Nd}_{(2610)}$ от -6.7 до -5.4. Их Sm-Nd модельные возрасты $T_{\text{Nd}}(\text{DM}) = 3.4\text{--}3.6$ млрд лет (табл. 7) являются на 1 млрд. лет более древними, чем U-Pb возрасты цирконов из этих пород, и свидетельствуют о длительной коровой предыстории источника расплава.

Обсуждение результатов

Неоархейские граниты Атаманского массива характеризуются высокими содержаниями кремнезема (от 74 до 79 мас. % SiO_2) и калия (от 4.6 до 7.0 мас. % K_2O), низкими концентрациями CaO и Sr, обогащены железом, галлием, высокозарядными катионами (Nb, Ta, Y, Th), редкоземельными элементами с сильным фракционированием лантаноидов и резкими отрицательными аномалиями Eu. Такие геохимические особенности сближают их с анорогенными гранитами А-типа. Для объяснения генезиса высококремнистых гранитов А-типа предложено, по крайней мере, шесть вариантов источников расплава: (1) фракционирование мантийных базальтовых магм, в некоторых случаях при взаимодействии с континентальной корой [24, 25], (2) высокотемпературное частичное плавление гранулитового рестита в нижней коре [26, 27], (3) малоглубинное (< 15 км) дегидратационное плавление известково-щелочных гранитоидов с биотитом и роговой обманкой [28], (4) частичное плавление базитовых нижнекорových источников при высоких температурах в обстановках растяжения [29, 30], (5) высокотемпературное плавление метасадочных гранулитов [31], (6) рецилинг субдуцированной океанической коры, как экзотического источника [32].

Табл. 6. Lu-Hf изотопный состав циркона из гранитов Атаманского массива
[Table 6. Lu-Hf isotope compositions of zircons from the Atamansky granite]

Точка [Spot]	Возраст (млн. лет) [Age (Ma)]	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{178}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\pm 2\sigma$	*T(DM) ^c
9.1	2610	0.269019	0.011114	0.006477	0.000073	0.281460	0.000073	1.467204	0.000129	0.281137	0.8	2.6	3119
7.1	2610	0.011540	0.000104	0.000380	0.000034	0.281030	0.000034	1.467208	0.000086	0.281011	-3.6	1.2	3311
10.1	2610	0.018081	0.000223	0.000588	0.000050	0.281005	0.000050	1.467334	0.000118	0.280971	-5.0	1.8	3402
9.2	2610	0.077797	0.001818	0.001992	0.000092	0.281048	0.000092	1.467195	0.000161	0.280948	-5.8	3.2	3483
6.1	2610	0.019651	0.000189	0.000678	0.000073	0.280984	0.000073	1.467170	0.000150	0.280950	-5.8	2.6	3449
4.1	2610	0.017326	0.000346	0.000592	0.000025	0.280973	0.000025	1.467271	0.000061	0.280943	-6.0	0.9	3462
11.1	2610	0.089424	0.001126	0.002581	0.000033	0.281052	0.000033	1.467176	0.000071	0.280923	-6.8	1.2	3556
2.1	2610	0.020823	0.000640	0.000676	0.000030	0.280938	0.000030	1.467316	0.000097	0.280904	-7.4	1.1	3550
5.1	2610	0.019403	0.000361	0.000603	0.000037	0.280921	0.000037	1.467194	0.000103	0.280891	-7.9	1.3	3577
13.1	2610	0.129423	0.002274	0.003436	0.000027	0.280982	0.000027	1.467155	0.000071	0.280810	-10.8	1.0	3844
8.1	3181	0.024737	0.002101	0.000692	0.000024	0.280713	0.000024	1.467281	0.000066	0.280671	-2.5	0.8	3682

*Примечания: первичное отношение изотопов гафния $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ рассчитано с использованием константы распада ^{176}Lu $\lambda = 1.867 \cdot 10^{-11}$; T_{DM}^C модельный возраст источника, рассчитанный по двухстадийной модели с использованием $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$, основанной на выделении магмы из средней континентальной коры, образованной из децелированной мантии.

[*Footnotes: Initial Hf isotope ratio $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ was calculated using ^{176}Lu $\lambda = 1.867 \cdot 10^{-11}$ decay constant. T_{DM}^C source model age calculated by two-stage model using $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.015$, based on magma melting from medium continental crust, formed from depleted mantle]

Граниты атаманского комплекса и риолиты лебединской свиты как единая вулканоплутоническая ассоциация

Ранее нами были получены геохимические, геохронологические и изотопные данные для неархейских риолитов (кварцевых порфиров) лебединской свиты, залегающих в южной части Тим-Ястребовской структуры [14, 33, 34]. Большинство из них свидетельствуют, что неархейские риолиты лебединской свиты и граниты атаманского комплекса являются комагматами и представляют собой единую вулканоплутоническую ассоциацию. Доказательством этого служат: (1) синхронность формирования – 2.61 млрд лет назад; (2) тесная пространственная сопряженность их локальных проявлений – в южном замыкании Тим-Ястребовской структуры; (3) одинаковый первичный изотопный состав Nd в породах и Hf в цирконах, свидетельствующий о едином источнике кислых магм, представленных в вулканической и плутонической фации.

Различия во всей совокупности изученных образцов риолитов и гранитов по содержаниям элементов группы железа, высоkozарядных и редкоземельных элементов, которые малоподвижны при метаморфизме и сопряженных метасоматических процессах, вероятно, отражают специфику магматических протолитов этих пород. Анализ данных показывает, что эти различия могли быть связаны с процессами дифференциации. Обогащение гранитов Fe_2O_3 , Cr и другими элементами группы железа при относительном обеднении TiO_2 и высоких $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ отношениях, возможно, обусловлено накоплением в гранитах магнетита. Наблюдаемые в гранитах широкие вариации величин аномалий Eu и их прямая корреляция с концентрациями Sr могло контролироваться кумулюсным плагиоклазом, неравномерно распределенным в объеме изученных гранитных массивов. Риолиты, обеднен-

Табл. 7. Sm-Nd изотопные данные для гранитов Атаманского комплекса
 [Table 7. Sm-Nd isotopic data for the Atamansky complex granites]

Образец [Sample]	Sm, мкг/г [Sm, ppm]	Nd, мкг/г [Nd, ppm]	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}^*$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	T**	$\epsilon\text{Nd}_{(T)}$	T-DM*
1544/209.0	9.117	42.46	0.1298	0.511146	2610	-6.7	3615
2281/385.7	7.999	37.23	0.1299	0.511215	2610	-5.4	3496

ные кальцием, элементами группы железа, но обогащенные титаном, высокозарядными и редкоземельными элементами, могли представлять комплементарные гранитному кумулусу остаточные расплавы. Это позволяет рассматривать граниты атаманского комплекса как промежуточные камеры, в которых происходила дифференциация исходных кислых магм с образованием остаточных риолитовых расплавов.

Таким образом, граниты атаманского комплекса и риолиты лебединской свиты являются комагматическими, образовались из единого источника, расплавы из которого претерпели дифференциацию на уровне становления гранитных массивов, и представляют собой единую вулканоплутоническую ассоциацию. Такие вулканоплутонические ассоциации высококремнистых гранитов и риолитов встречаются очень редко [35].

Источники расплавов и условия образования магм

Sm-Nd изотопные данные ($\epsilon\text{Nd}_{(2610)}$ от -5.4 до -6.7) в валовых пробах указывают, что кислые магмы формировались за счет корового источника с палеоархейской (3.4–3.6 млрд лет) предысторией (табл. 7). Этими породами могли служить мезоархейские метapelитовые гранулиты обоянского комплекса [36], которые известны в виде крупных останцов среди мезоархейских ТТГ, имеют палеоархейские модельные возрасты $T_{\text{Nd}}(\text{DM}) = 3.49\text{--}3.64$ млрд лет [37, 38] и содержат детритовый циркон с U-Pb возрастaми 3.35–3.55 млрд лет [39].

U-Pb изотопная система в цирконе из гранитов и риолитов фактически не сохранила информацию о палеоархейском протолите в источнике магм. Высокие температуры этих магм, установленные для риолитов [34], приводят, по-видимому, к полному растворению цирконов протолита, стирая предшествующую коровую историю. Из трех проб (более 100 зерен цирконов) гранитов и риолитов сохранилось только одно унаследованное более древнее ядро.

Lu-Hf изотопные анализы выявили широкие вариации изотопного состава гафния в отдельных зернах магматического циркона из гранитов и риолитов (табл. 6, рис. 9). Это, возможно, отражает Lu-Hf гетерогенность среды кристаллизации цирконов, унаследованную от разных по составу и возрасту пород в коровом источнике расплавов. Возможное участие разновозрастных/гетерогенных архейских пород в источниках кислых магм, выявленное модельными возрастaми циркона $T_{\text{Hf}}(\text{DM})$ в интервале 3.12–3.84 млрд лет, согласуется с возрастной гетерогенностью архей-

ской коры Курского блока: в её составе, наряду с обоянскими ортогнейсами и метаосадками с палеоархейскими детритовыми цирконами [39], широко представлены мезоархейские кислые вулканиты зеленокаменных поясов с возрастом около 3.13 млрд лет и ТТГ-ассоциации с возрастом около 3 млрд лет [40, 41].

Таким образом, можно сделать вывод о гетерогенности корового источника для неоархейских внутриплитных гранитоидов Курского блока, основными компонентами которого были палеоархейские метapelиты и мезоархейские ТТГ-ассоциации.

Геохимические характеристики валовых проб риолитов и гранитов, такие как высокие отношения Ga/Al и высокие концентрации тяжелых редкоземельных элементов с резкой отрицательной Eu аномалией, также являются указанием на ведущую роль плагиоклаза в реститовой ассоциации кислых магм, что является свидетельством небольших глубин магмогенерации. Высокие Fe/Mg отношения в породах могут служить указанием на доминанту ортопироксена в реститовой ассоциации, что предполагает небольшие давления и относительно сухие условия генерации кислого расплава. Таким образом, все полученные данные указывают на формирование кислых магм при высоких температурах и низких давлениях в условиях верхней коры. Такие условия образования кислых расплавов хорошо согласуются с экспериментальными данными по дегидратационному плавлению высокоглиноземистого тоналита при давлении 4 кбар [28]. Содержание петрогенных элементов в расплаве, полученном в ходе эксперимента, близко к составам изученных гранитов атаманского комплекса.

Кислые расплавы, материнские для изученных гранитов с возрастом 2.61 млрд лет, могли образоваться при 20% дегидратационном плавлении смеси метapelит-ТТГ в равновесии с Plm-Vt-Orх-Pl реститом при давлении не более 4 кбар [14]. Граниты атаманского комплекса кристаллизовались на более глубоких уровнях, чем риолиты, и содержали в себе примесь Орх-Pl реститовой или кумулусной компоненты, что определило их геохимические отличия от риолитов, освобожденных от этих фаз в ходе перемещения расплавов на более высокие уровни коры.

Близким петрогенетическим аналогом являются высокожелезистые позднеюрские граниты А-типа в Южно-Китайском блоке, сформировавшиеся при высокотемпературном (> 960 °C) плавлении метаосадочных гранулитов [31].

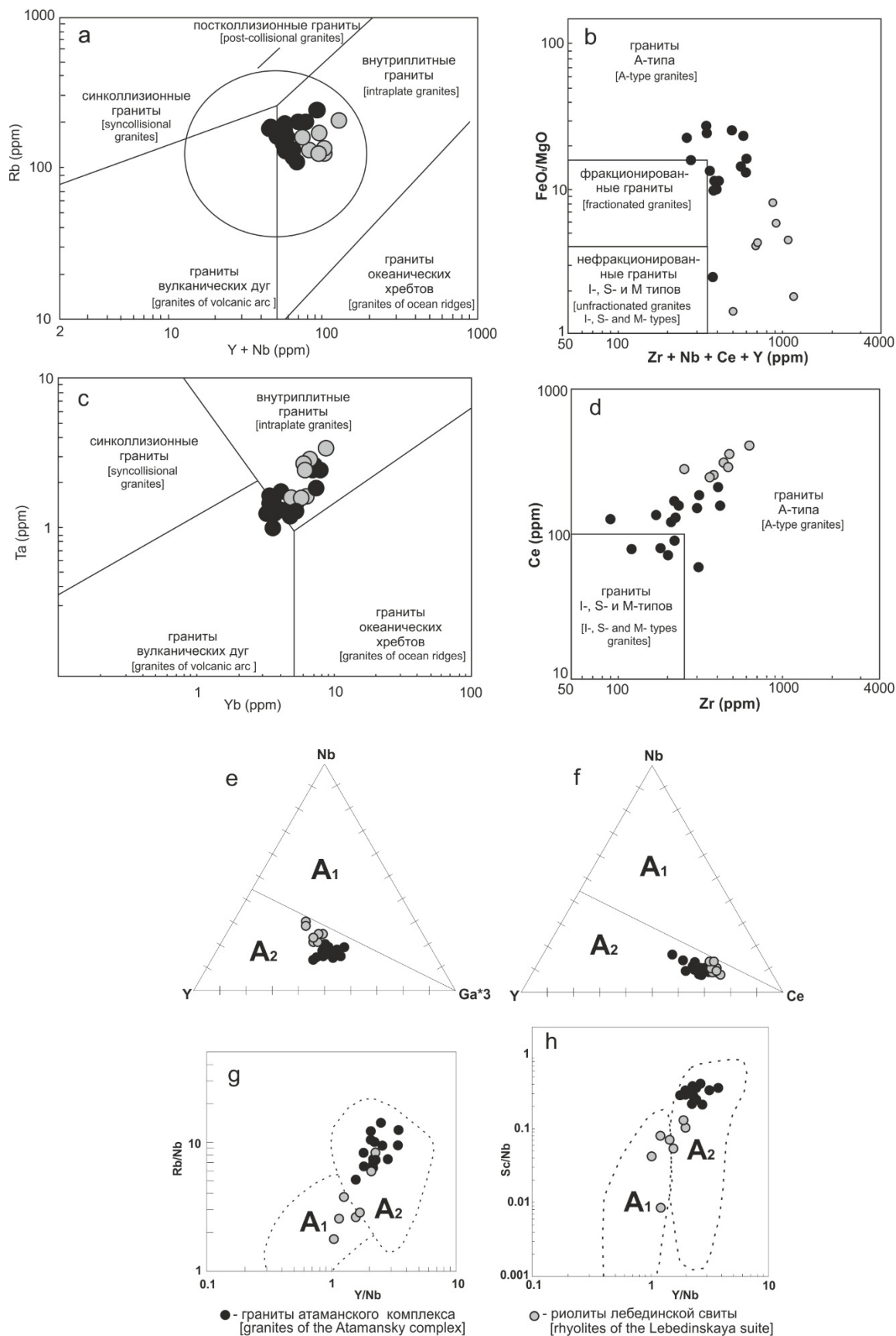


Рис. 10. Составы гранитов атаманского комплекса на дискриминантных диаграммах по [27, 42, 43].
[Fig. 10.] Discrimination diagrams for the granites of the Atamansky complex. Fields of post-collision granites are from: [42] (a, c), [27] (b, d), [43] (e, f, g, h).]

*Тектоническая обстановка образования
гранитов атаманского комплекса*

Согласно петрологическим реконструкциям, исходные для гранитов кислые расплавы были сформированы при дегидратационном плавлении кислых пород при давлении около 4 кбар, т.е. на небольшой глубине 12–14 км [14]. Это требует источника дополнительного тепла на уровне средней коры, которым могут быть только мантийные магмы, скорее всего связанные с (1) подъемом астеносферного плюма и/или (2) андерплейтингом и внедрением в кору базитовых расплавов. Такие обстановки предполагают резкое утонение литосферы и подъем астеносферной мантии. Тектонический режим, инициировавший появление этих магм, представляет отдельную проблему при изучении гранитов А-типа.

На дискриминантных петротектонических диаграммах, которые широко используются для идентификации тектонических обстановок формирования магматических пород, граниты атаманского комплекса и риолиты лебединской свиты попадают в поля и внутриплитных, и постколлизийных гранитов (рис. 10). На диаграммах для разделения гранитов А-типа [43] большая часть точек составов риолитов попадает в поле анорогенных (A1) гранитов (рис. 10), а точки составов гранитов попадают в поле постколлизийных (A2) гранитов. При этом, судя по очень железистым составам биотита и роговых обманок, граниты следует относить скорее к внутриплитной, чем к постколлизийной обстановке.

Имеющаяся информация по восточной Сарматии (по Курскому блоку и сопряженной территории Украинского щита на Среднеприднепровском и Западноприазовском блоках) не дает оснований в пользу постколлизийной природы кислого магматизма и свидетельствует скорее о его сопряженности с внутриплитной обстановкой.

В восточной Сарматии не известны свидетельства коллизийных процессов, предшествовавших формированию риолитов и гранитов 2610 млн лет назад [12, 13]. Проявления кислого магматизма с возрастом 2.61 млрд лет локальны. Кроме риолитов лебединской свиты и гранитов атаманского комплекса, выявленных в южном замыкании Тим-Ястребовской структуры и в северном замыкании Волоатовской структуры, в пределах Сарматии неизвестны высококремнистые калиевые граниты и риолиты с возрастом 2.61 млрд лет [44]. Аргумент локальности сложно объяснить сопряженностью кислого магматизма с постколлизийной обстановкой, но можно согласовать с внутриплитной обстановкой, учитывая возможность незакономерного разобщенного распределения малоглубинных очагов плавления самых верхних частей литосферы под воздействием глубинного плюма.

В пределах Курского блока нет датировок широко проявленного базитового магматизма с возрастом около 2.6 млрд лет, хотя в разрезах скважин 2281 и 2169 метабазиты подстилают риолиты лебединской свиты и прорываются внутриплитными гранитами. В

пределах Среднеприднепровского блока риолиты и граниты с возрастом 2.6 млрд лет отсутствуют, но под палеопротерозойскими железисто-кремнистыми формациями залегает мощная толща (до 850 м) метабазитов новокириворожской свиты с плюмовыми геохимическими характеристиками [45]. Таким образом, источником тепла мог быть базитовый плюмовый магматизм, проявления которого мы наблюдаем в восточной Сарматии. Под воздействием этого глубинного плюма во внутриплитной обстановке образовались основные магмы, малоглубинные промежуточные очаги которых инициировали плавление кислых пород в верхних частях коры с образованием кислой вулканоплутонической ассоциации.

Выводы

Граниты атаманского массива, который является петротипом атаманского комплекса, характеризуются контрастными отличиями от остальных комплексов гранитоидов Воронежского кристаллического массива:

1. имеют возраст 2.61 млрд лет, высокие содержания кремнезема, низкие содержания кальция и стронция и очень высокую железистость, глубокие европейские аномалии;
2. образуют локально проявленную единую вулканоплутоническую ассоциацию с высококремнистыми риолитами лебединской свиты;
3. характеризуются длительной коровой историей протолитов и гетерогенностью коровых источников, о чём свидетельствует Lu-Hf изотопный состав циркона и Sm-Nd состав валовых проб;
4. образовались при высокотемпературном малоглубинном плавлении во внутриплитной обстановке, в результате подъема мантийного плюма и внедрения в кору базальтовых магм, которые являлись источниками тепла.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Крестин Е. М., Афонин В. В. Главные особенности петрографии и геохимии гранитоидных формаций Курской магнитной аномалии // *Бюлл. МОИП*. 1976. Вып. 51. № 1. С. 89–99.
2. Корреляционная схема стратиграфии и магматизма раннего докембрия Воронежского кристаллического массива / Б. М. Петров [и др.]. МПР РФ, Центргео, 1998.
3. Терентьев Р. А. Петрография и геохронология гранитов Лискинского плутона Воронежского кристаллического массива // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2016. № 3. С. 43–52. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2016/03/2016-03-06.pdf> (дата обращения: 20.05.2020).
4. Terentiev R. A., Savko K. A., Santosh M., Petrakova M. E., Korish E. H. Paleoproterozoic granitoids of the Don terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications // *Precambrian Research*. 2020. Vol. 346, 105790. DOI: 10.1016/j.precamres.2020.105790.

5. Terentiev R. A., Savko K. A., Santosh M., Korish E. H., Sarkisyan L. S. Paleoproterozoic granitoids of the Losevo terrane, East European Craton: Age, magma source and tectonic implications // *Precambrian Research*. 2016. Vol. 287. pp. 48–72. DOI: 10.1016/j.precamres.2016.10.015
6. Савко К. А., Терентьев Р. А., Ларионов А. Н. Вещественный состав и возраст мезократовых пород Ольховского интрузива Воронежского кристаллического массива // *Известия ВУЗов. Геология и разведка*. 2014. № 5. С. 71–75.
7. Terentiev R. A., Savko K. A., Santosh M. Post-collisional two-stage magmatism in the East Sarmatian Orogen, East European Craton: evidence from the Olkhovsky ring complex // *J. Geol. Soc.* 2018. Vol. 175. pp. 86–99. DOI: 10.1144/jgs2017-017
8. Савко К. А., Самсонов А. В., Ларионов А. Н., Ларионова Ю. О., Базиков Н. С. Палеопротерозойские граниты А- и S-типов востока Воронежского кристаллического массива: геохронология, петрогенезис и тектоническая обстановка формирования // *Петрология*. 2014. Т. 22. № 3. С. 235–264. DOI: 10.7868/S0869590314030054
9. Савко К. А., Самсонов А. В., Базиков Н. С., Козлова Е. Н. Палеопротерозойские гранитоиды Тим-Ястребовской структуры Воронежского кристаллического массива: геохимия, геохронология и источники расплавов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2014. № 2. С. 56–78. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/geo-logia/2014/02/2014-02-09.pdf> (дата обращения: 20.05.2020).
10. Крестин Е. М., Леоненко Е. И. Петрология и потенциальная рудоносность габбро-диорит-гранодиоритовой формации раннего докембрия КМА // *Известия ВУЗов. Геология и разведка*. 1978. № 8. С. 33–45.
11. Дунай Е. И., Горяшин В. И. Петротип малиновского комплекса позднекарельских субщелочных гранитов в мегаблоке КМА // *Геол. Вестн. центральных р-нов России*. 2000. № 2. С. 19–23.
12. 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
13. Savko K. A., Samsonov A. V., Kotov A. B., Sal'nikova E. B., Korish E. H., Larionov A. N., Anisimova I. V., Bazikov N. S. The Early Precambrian Metamorphic Events in Eastern Sarmatia // *Precambrian Research*. 2018. Vol. 311. pp. 1–23. DOI: 10.1016/j.precamres.2018.04.009
14. Savko K. A., Samsonov A. V., Kholina N. V., Larionov A. N., Zaitseva M. V., Korish E. H., Bazikov N. S., Terentiev R. A. 2.6 Ga high-Si rhyolites and granites in the Kursk Domain, Eastern Sarmatia: Petrology and application for the Archaeal palaeocontinental correlations // *Precambrian Research*. 2019. Vol. 322. pp. 170–192. DOI: 10.1016/j.precamres.2019.01.006
15. Савко К. А., Базиков Н. С., Артеменко Г. В. Геохимическая эволюция железисто-кремнистых формаций Воронежского кристаллического массива в раннем докембрии: источники вещества и геохронологические ограничения // *Стратиграфия. Геол. Корреляция*. 2015. Т. 23. № 5. С. 3–21. DOI: 10.7868/S0869592X15050063
16. Савко К. А., Кузнецов А. Б., Овчинникова М. Ю. Карбонатные отложения Восточной Сарматии (раннедокембрийская игнатеевская свита, Курский блок): условия образования и палеоконтинентальные корреляции // *Стратиграфия. Геол. корреляция*. 2020. Т. 28. № 3. С. 3–26. DOI: 10.31857/S0869592X20030102
17. Найденов И. В., Деревянкин Ю. А., Деревянкина Л. Ф., Архипова А. А. Новые данные по радиологическому воз-
расту гранитоидов центральной части Курской магнитной аномалии // *Докл. АН*. 1996. Т. 351. № 6. С. 802–805.
18. Black L. P., Gulson B. L. The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways Range, Northern Territory // *J. Austral. Geol. Geophys.* 1978. Vol. 3. pp. 227–232. URL: https://d28rz98at9flks.cloudfront.net/80964/Jou1978_v3_n3_p227.pdf (дата обращения: 20.05.2020).
19. 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
20. Giovanardi T., Lugli F. The HF-INATOR: a free data reduction spreadsheet for Lu/Hf isotope analysis // *Earth Sci. Informat.* 2017. Vol. 10. pp. 517–523. DOI: 10.1007/s12145-017-0303-9
21. 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
22. Leake B., Wooley A., Arps C., Birch W., Gilbert C., Grice J., Hawthorne F., Kato A., Kisch H., Krivovichev V., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Maresch W., Nickel E., Rock N., Schumacher J., Smith D., Stephenson N., Guo Y. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names // *Am. Mineral.* 1997. Vol. 82. pp. 1019–1037. DOI: 10.1180/minmag.1997.061.405.13
23. 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. DOI: 10.1180/0026461067050348
24. Bonin B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems, and prospects // *Lithos.* 2007. Vol. 97. pp. 1–29. DOI: 10.1016/j.lithos.2006.12.007
25. Frost C. D., Frost B. R. Reduced rapakivi-type granites: the tholeiite connection // *Geology*. 1997. Vol. 25. pp. 647–650.
26. Collins W. J., Beams S. D., White A. J. R., Chappell B. W. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia // *Contribut. Mineral. Petrol.* 1982. Vol. 80. pp. 189–200. DOI: 10.1007/BF00374895
27. Whalen J. B., Currie K. L., Chappell B. W. A-type granites: geochemical characteristics discrimination and petrogenesis // *Contribut. Mineral. Petrol.* 1987. Vol. 95. pp. 407–419.
28. Patiño-Douce A. E. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids // *Geology*. 1997. Vol. 25. pp. 743–746. DOI: 10.1130/0091-7613(1997)025<0743:GOMATG>2.3.CO;2
29. Frost C., Frost B., Bell J., Chamberlain K. The relationship between A-type granites and residual magmas from anorthosite: evidence from the northern Sherman batholith, Laramie Mountains, Wyoming, USA // *Precambrian Research*. 2002. Vol. 119. No. 1–4. pp. 45–71. DOI: 10.1016/S0301-9268(02)00117-1
30. Wu F. Y., Sun D. Y., Li H. M., Jahn B. M., Wilde S. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis // *Chem. Geol.* 2002. Vol. 187. No. 1–2. pp. 143–173. DOI: 10.1016/S0009-2541(02)00018-9
31. Huang H. Q., Li X. H., Li W. X., Li Z. X. Formation of high $\delta^{18}\text{O}$ fayalite-bearing A-type granite by high-temperature melting of granulitic metasedimentary rocks, southern China // *Geology*. 2011. Vol. 39. No. 10. pp. 903–906. DOI: 10.1130/G32080.1
32. Yang W.-B., Niu H.-C., Hollings P., Zurevinski S. E., Li N.-B. The role of recycled oceanic crust in the generation of alkaline A-type granites // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2017. Vol. 122.

- № 12. pp. 9775–9783. DOI: 10.1002/2017JB 014921
33. Савко К. А., Холина Н. В., Холин В. М., Ларионов А. Н. Возраст неорархейских ультракалийевых риолитов – важный геохронологический репер эволюции раннедокембрийской коры Воронежского кристаллического массива // *Изотопное датирование геологических процессов: новые результаты, подходы и перспективы*: материалы VI Российской конференции по изотопной геохронологии. СПб: Springer, 2–5 июня 2015. С. 247–249. URL: <http://www.geol.vsu.ru/interior/wp-content/uploads/2015/06/Thesis.pdf> (дата обращения: 20.05.2020).
34. Холина Н. В., Савко К. А., Холин В. М. Высокие температуры кристаллизации неорархейских риолитов Курского блока Воронежского кристаллического массива: результаты минеральной термометрии // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2016. № 3. С. 53–60. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2016/03/2016-03-07.pdf> (дата обращения: 20.05.2020).
35. Frost C., Frost B., Beard J. S. On silica-rich granitoids and their eruptive equivalents // *Am. Mineral*. 2016. Vol. 101. pp. 1268–1284. DOI: 10.2138/am-2016-5307
36. Савко К. А. Реакционные структуры и эволюция метаморфизма шпинелевых гранулитов Воронежского кристаллического массива // *Петрология*. 2000. № 2. С. 165–181.
37. Щипанский А. А., Самсонов А. В., Петрова А. Ю., Ларионова Ю. О. Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое // *Геотектоника*. 2007. № 1. С. 43–70. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9462648> (дата обращения: 20.05.2020).
38. Савко К. А., Котов А. Б., Сальникова Е. Б., Кориш Е. Х., Пилюгин С. М., Артеменко Г. В., Кориковский С. П. Возраст метаморфизма гранулитовых комплексов Воронежского кристаллического массива: результаты U-Pb геохронологических исследований монацита // *Докл. АН*. 2010. Т. 435. № 5. С. 647–652. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15538654> (дата обращения: 20.05.2020).
39. Савко К. А., Самсонов А. В., Ларионов А. Н., Кориш Е. Х., Червяковская М. В., Базиков Н. С. Эпизоды роста континентальной коры в раннем докембрии Сарматии // *Фундаментальные вопросы тектоники и геодинамики*: материалы ЛП Тектонического совещания. М.: «ГЕОС», 28 января – 1 февраля 2020. Т. 2. С. 270–273. URL: <http://www.ginras.ru/materials/files/MTS-2020-2%20.pdf> (дата обращения: 20.05.2020).
40. Савко К. А., Самсонов А. В., Сальникова Е. Б., Ларионов А. Н., Червяковская М. В., Базиков Н. С., Кориш Е. Х. Геохронология ТТГ ассоциации в мезоархее Курского блока Восточной Сарматии // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2019. № 2. С. 70–80. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2019/02/2019-02-08.pdf> (дата обращения: 20.05.2020).
41. Савко К. А., Самсонов А. В., Ларионов А. Н. Мезоархейские кислые вулканиты Курского блока, Воронежский кристаллический массив: состав, возраст и корреляции с Украинским щитом // *Докл. АН*. 2019. Т. 486. № 6. С. 718–722. DOI: 10.31857/S0869-56524866718-722
42. Pearce J. Sources and settings of granitic rocks // *Episodes*. 1996. Vol. 19. pp. 120–125. DOI: 10.18814/epiugs/1996/v19i4/005
43. Eby G. N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications // *Geology*. 1992. Vol. 20. pp. 641–644. DOI: 10.1130/0091-7613(1992)020<0641:CSO-TAT>2.3.CO;2
44. Щербак Н. П., Артеменко Г. В., Лесная И. М., Пономаренко А. Н. Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Архей. Киев, Наукова думка, 2005. 243 с.
45. Артеменко Г. В., Самборская И. А., Мартынюк А. В. Геохимическая характеристика и геодинамические условия формирования метабазитов и метакоматиитов Кривбасса (Среднеприднепровский мегаблок УЩ) // *Мінералогічний журнал*. 2015. Т. 37. № 2. С. 76–89. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mineral_2015_37_2_9 (дата обращения: 20.05.2020).

The petrotype of the Neoproterozoic Atamansky granite complex (Kursk block, Sarmatia): geochemistry, geochronology, and isotopic taxonomy

© 2020 K. A. Savko¹✉, N. V. Kholina¹, A. V. Samsonov², E. Kh. Korish¹,
M. V. Chervyakovskaya³, N. S. Bazikov¹, A. N. Larionov⁴

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

²*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, 35 Staromonetny per, Moscow 119017, Russian Federation*

³*Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 15 Akademika Vonsovskogo st., Yekaterinburg 620016, Russian Federation*

⁴*Center of Isotopic Research of A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI), 74 Sredny pr., Saint-Petersburg 199106, Russian Federation*

Abstract

Introduction: The Atamansky complex, as well as most early Precambrian magmatic and metamorphic complexes of the Voronezh Crystalline Massif, has no modern, accurate geochronological data and geochemical characteristics. The aim of the study is to provide the most complete description of the petrotype of the Atamansky massif in the similarly-named complex.

Methodology: The composition of petrogenic, small, and rare elements in the rocks of the Atamansky massif was determined, their Sm-Nd and Lu-Hf isotopy was studied, local mineral analyses were carried out, the age of the rocks was determined using the U-Pb method applied to zircon.

Results and discussion: The Atamansky massif, which is a petrotype of the Atamansky complex in the Kursk block (Sarmatia), is radically different from the rest of the early Precambrian granitoids of the Voronezh Crystalline Massif. Granitoids of the Atamansky complex are 2.61 billion year old, they are rich in silica, have low calcium and strontium content, high iron content, and deep europium anomalies. The Lu-Hf isotopic composition of zircon and Sm-Nd isotopy of bulk samples indicate a long crustal history of protoliths and heterogeneity of Paleoproterozoic crustal sources.

Conclusions: The Atamansky granite forms a locally manifested unified volcanic-plutonic association with high-silica rhyolites of the Lebedinskaya Formation. The granite was formed during high-temperature shallow melting in an intraplate environment as a result of the rise of the mantle plume and the introduction of basaltic magma into the crust, which served as heat sources.

Keywords: Kursk block, granite, U-Pb isotopic age, isotopic taxonomy, sources of melts, petrotype.

Funding: The study was supported by projects of the Russian Foundation for Basic Research no. 19-05-00159 and Russian Science Foundation no. 16-17-10283, the State Assignment of the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences "Petrology and mineralization of magmatism of intraplate and postorogenic environments: the role of lithospheric and asthenospheric sources in the formation of melts".



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

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

For citation: Savko K. A., Kholina N. V., Samsonov A. V., Korish E. Kh., Chervyakovskaya M. V., Bazikov N. S., Larionov A. N. The petrotype of the Neoproterozoic Atamansky granite complex (Kursk block, Sarmatia): geochemistry, geochronology, and isotopic taxonomy *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2020, No. 2, pp. 20–43. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2020.2/2857>

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

REFERENCES

1. Krestin E. M., Afonin V. V. Glavnye osobennosti petrografii i geokhimii granitoidnykh formatsii Kurskoi magnitnoi anomalii [The main petrographic and geochemical features of Kursk magnetic anomaly granitoid formations]. *Byull. MOIP*, 1976. vol. 51, no. 1, pp. 89–99. (in Russ.).
2. *Korrelyatsionnaya skhema stratigrafii i magmatizma rannego dokembriya Voronezhskogo kristallicheskogo massiva* [Correlation scheme of stratigraphy and magmatism of early Precambrian of Voronezh Crystalline Massif] / B. M. Petrov [et al.]. Moscow, MPR RF, Centrgeo, 1998. (in Russ.).
3. Terentiev R. A. The petrology and geochronology of granites from Liski pluton, Voronezh Crystalline Massif. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2016. no 3, pp. 43–52. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2016/03/2016-03-06.pdf> (accessed 20.05.2020) (in Russ.).
4. Terentiev R. A., Savko K. A., Santosh M., Petrakova M. E., Korish E. H. Paleoproterozoic granitoids of the Don terrane, East-Sarmatian Orogen: age, magma source and tectonic implications *Precambrian Research*, 2020, vol. 346, 105790. DOI: 10.1016/j.precamres.2020.105790.
5. Terentiev R. A., Savko K. A., Santosh M., Korish E. H., Sarkisyan L. S. Paleoproterozoic granitoids of the Losevo terrane, East European Craton: Age, magma source and tectonic implications. *Precambrian Research*, 2016, vol. 287, pp. 48–72. DOI: 10.1016/j.precamres.2016.10.015
6. Savko K. A., Terentiev R. A., Larionov A. N. Veshchestvennyi sostav i vozrast mezokratovykh porod Ol'khovskogo intruziva Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Composition and age of mesocratic rocks of the Olkhovskiy pluton, Voronezh Crystalline Massif]. *Izvestiâ vyssih uchebnykh zavedenij. Geologiya i razvedka = Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 2014, no. 5, pp. 71–75. (in Russ.).
7. Terentiev R. A., Savko K. A., Santosh M. Post-collisional two-stage magmatism in the East Sarmatian Orogen, East European Craton: evidence from the Olkhovskiy ring complex. *J. Geol. Soc*, 2018, vol. 175, pp. 86–99. DOI: 10.1144/jgs2017-017
8. Savko K. A., Samsonov A. V., Larionov A. N., Larionova Y. O., Bazikov N. S. Paleoproterozoic A- and S-granites in the eastern Voronezh Crystalline Massif: Geochronology, petrogenesis and tectonic setting of origin. *Petrology*, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 205–233. DOI: 10.1134/S0869591114030059
9. 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. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2014/02/2014-02-09.pdf> (accessed: 20.05.2020). (in Russ.).
10. Krestin E. M., Leonenko E. I. Petrologiya i potentsial'naya rudonosnost' gabbro-diorit-granodioritovoi formatsii rannego dokembriya KMA [Petrology and potential ore content of the gabbro-diorite-granodiorite formation of the Kursk Magnetic Anomaly Early Precambrian]. *Izvestiâ vyssih uchebnykh zavedenij. Geologiya i razvedka = Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 1978, no. 8. pp. 33–45. (in Russ.).
11. Dunai E. I., Goryashin V. I. Petrotip malinovskogo kompleksa pozdnokarel'skikh subshchelochnykh granitov v megabloke KMA [The petrotype of the Malinovskiy late karelian subalkaline granite complex in KMA megablock]. *Geologicheskii vestnik tsentral'nykh raionov Rossii*, 2000, no. 2, pp. 19–23. (in Russ.).
12. 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
13. Savko K. A., Samsonov A. V., Kotov A. B., Sal'nikova E. B., Korish E. H., Larionov A. N., Anisimova I. V., Bazikov N. S. The Early Precambrian Metamorphic Events in Eastern Sarmatia. *Precambrian Research*, 2018, vol. 311, pp. 1–23. DOI: 10.1016/j.precamres.2018.04.009
14. Savko K. A., Samsonov A. V., Kholina N. V., Larionov A. N., Zaitseva M. V., Korish E. H., Bazikov N. S., Terentiev R. A. 2.6 Ga high-Si rhyolites and granites in the Kursk Domain, Eastern Sarmatia: Petrology and application for the Archaean palaeocontinental correlations. *Precambrian Research*, 2019, vol. 322, pp. 170–192. DOI: 10.1016/j.precamres.2019.01.006
15. Savko K. A., Bazikov N. S., Artemenko G. V. Geochemical evolution of the banded iron formations of the Voronezh crystalline massif in the early Precambrian: Sources of matter and geochronological constraints. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2015, vol. 23, no. 5, pp. 451–467. DOI: 10.1134/S0869593815050068
16. Savko K. A., Kuznetsov A. B., Ovchinnikova M. Yu. Carbonate deposits of the Eastern Sarmatia (the Early Precambrian Ignateev Formation, the Kursk Block): sedimentation conditions and paleocontinental correlations. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2020, vol. 27, no. 5, pp. 499–513. DOI: 10.31857/S0869592X20030102
17. Naidenkov I. V., Derevyankin Yu. A., Derevyankina L. F., Arkhipova A. A. Novye dannye po radiologicheskomu vozrastu granitoidov tsentral'noi chasti Kurskoi magnitnoi anomalii [New data on geochronological age of Kursk magnetic anomaly central part granitoids]. *Doklady akademii nauk = Reports of the Academy of Sciences*, 1996, vol. 151, no. 6, pp. 802–805. (in Russ.).
18. Black L. P., Gulson B. L. The age of the Mud Tank carbonate, Strangways Range, Northern Territory. *J. Austral. Geol. Geophys.*, 1978, vol. 3, pp. 227–232. URL: https://d28rz98at9flks.cloudfront.net/80964/Jou1978_v3_n3_p227.pdf (accessed: 20.05.2020).
19. 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
20. Giovanardi T., Lugli F. The Hf-INATOR: a free data reduction software. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2014, vol. 29, no. 1, pp. 1–10. DOI: 10.1039/C3AY23001A

- ion spreadsheet for Lu/Hf isotope analysis. *Earth Sci. Informat*, 2017, vol. 10, pp. 517–523. DOI: 10.1007/s12145-017-0303-9
21. 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
 22. Leake B., Wooley A., Arps C., Birch W., Gilbert C., Grice J., Hawthorne F., Kato A., Kisch H., Krivovichev V., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Maresch W., Nickel E., Rock N., Schumacher J., Smith D., Stephenson N., Guo Y. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *Am. Mineral*, 1997, vol. 82, pp. 1019–1037. DOI: 10.1180/minmag.1997.061.405.13
 23. 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. DOI: 10.1180/0026461067050348
 24. Bonin B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems, and prospects. *Lithos*, 2007, vol. 97, pp. 1–29. DOI: 10.1016/j.lithos.2006.12.007
 25. Frost C. D., Frost B. R. Reduced rapakivi-type granites: the tholeiite connection. *Geology*, 1997, vol. 25, pp. 647–650.
 26. Collins W. J., Beams S. D., White A. J. R., Chappell B. W. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contribut. Mineral. Petrol.*, 1982, vol. 80, pp. 189–200. DOI: 10.1007/BF00374895
 27. Whalen J. B., Currie K. L., Chappell B. W. A-type granites: geochemical characteristics discrimination and petrogenesis. *Contribut. Mineral. Petrol.*, 1987, vol. 95, pp. 407–419.
 28. Patiño-Douce A.E. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. *Geology*, 1997, vol. 25, pp. 743–746. DOI: 10.1130/0091-7613(1997)025<0743:GOMATG>2.3.CO;2
 29. Frost C., Frost B., Bell J., Chamberlain K. The relationship between A-type granites and residual magmas from anorthosite: evidence from the northern Sherman batholith, Laramie Mountains, Wyoming, USA. *Precambrian Research*, 2002, vol. 119, no. 1–4, pp. 45–71. DOI: 10.1016/S0301-9268(02)00117-1
 30. Wu F. Y., Sun D. Y., Li H. M., Jahn B. M., Wilde S. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chem. Geol.*, 2002, vol. 187, no. 1–2, pp. 143–173. DOI: 10.1016/S0009-2541(02)00018-9
 31. Huang H. Q., Li X. H., Li W. X., Li Z. X. Formation of high $\delta^{18}\text{O}$ fayalite-bearing A-type granite by high-temperature melting of granulitic metasedimentary rocks, southern China. *Geology*, 2011, vol. 39, no. 10, pp. 903–906. DOI: 10.1130/G32080.1
 32. Yang W.-B., Niu H.-C., Hollings P., Zurevinski S. E., Li N.-B. The role of recycled oceanic crust in the generation of alkaline A-type granites. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2017, vol. 122, no. 12, pp. 9775–9783. DOI: 10.1002/2017JB 014921
 33. Savko K. A., Kholina N. V., Kholin V. M., Larionov A. N. Vozrast neoarkeiskikh ul'trakalievyykh riolitov – vazhnyi geokhronologicheskii reper evolyutsii rannedokembriiskoi kory Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [Neoarchean ultrapotassium rhyolites age as an important geochronological benchmark of Voronezh Crystalline Massif early Precambrian crust evolution]. *Izotopnoe datirovanie geologicheskikh protsessov: novye rezul'taty, podkhody i perspektivy* [Isotopic dating of geological processes: new results approaches, and perspectives]. Saint Petersburg, June 2–5, 2015, Springer, 2015, pp. 247–249. URL: <http://www.geol.vsu.ru/interior/wp-content/uploads/2015/06/Thesis.pdf> (accessed: 20.05.2020). (in Russ.).
 34. Kholina N. V., Savko K. A., Kholin V. M. High temperature crystallization Neoproterozoic rhyolites of the Kursk block, Voronezh Crystalline Massif: The Mineral thermometry results. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2016, no. 3, pp. 53–60. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2016/03/2016-03-07.pdf> (accessed: 20.05.2020). (in Russ.).
 35. Frost C., Frost B., Beard J. S. On silica-rich granitoids and their eruptive equivalents. *Am. Mineral*, 2016, vol. 101, pp. 1268–1284. DOI: 10.2138/am-2016-5307
 36. Savko K. A. Reaction Textures and Metamorphic Evolution of Spinel Granulites in the Voronezh Crystalline Massif. *Petrology*, 2000, vol. 8, no. 2, pp. 165–181. URL: http://www.geol.vsu.ru/interior/wp-content/uploads/2013/03/Petrology_2_2000.pdf (accessed 20.05.2020).
 37. Shchipansky A. A., Samsonov A. V., Petrova A. Yu., Larionova Yu. O. Geodynamics of the eastern margin of Sarmatia in the Paleoproterozoic. *Geotectonics*, 2007, vol. 41, no. 1, pp. 38–62. DOI: 10.1134/S0016852107010050
 38. Savko K. A., Kotov A. B., Sal'nikova E. B., Korish E. Kh., Pilugin S. M., Artemenko G. V., Korikovskii S. P. The Age of Metamorphism of Granulite Complexes of the Voronezh Crystalline Massif: The Monazite U-Pb Geochronology. *Doklady Earth Sciences*, 2010, vol. 435, no. 2, pp. 1575–1580. DOI: 10.1134/S1028334X10120056
 39. Savko K. A., Samsonov A. V., Larionov A. N., Korish E. Kh., Chervyakovskaya M. V., Bazikov N. S. Epizody rosta kontinental'noi kory v rannem dokembrii Sarmatii [Episodes of continental crust growth in the early Precambrian of Sarmatia]. *Fundamental'nye voprosy tektoniki i geodinamiki* [Fundamental questions of tectonics and geodynamics]. Moscow, January 28 – February 1, 2020. Moscow, GEOS, 2020, vol. 2, pp. 270–273. URL: <http://www.ginras.ru/materials/files/MTS-2020-2%20.pdf> (accessed: 20.05.2020). (in Russ.).
 40. Savko K. A., Samsonov A. V., Sal'nikova E. B., Larionov A. N., Chervyakovskaya M. V., Bazikov N. S., Korish E. Kh. Geochronology of TTG association in Mesoarchean within the Kursk block, Eastern Sarmatia. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2019, no. 2, pp. 70–80. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2019/02/2019-02-08.pdf> (accessed: 20.05.2020). (in Russ.).
 41. Savko K. A., Samsonov A. V., Larionov A. N. Mesoarchean silicic volcanics in the Kursk block of the Voronezh Crystalline Massif: Composition, age, and correlations with the Ukrainian Shield. *Doklady Earth Sciences*, 2019, vol. 486, no. 2, pp. 719–723. DOI: 10.1134/S1028334X19060321
 42. Pearce J. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 1996, vol. 19, pp. 120–125. DOI: 10.18814/epiugs/1996/v19i4/005
 43. Eby G. N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 1992, vol. 20, pp. 641–644. DOI: 10.1130/0091-7613(1992)020<0641:CSO-TAT>2.3.CO;2
 44. Shcherbak N. P., Artemenko G. V., Lesnaya I. M., Ponomarenko A. N. *Geokhronologiya rannego dokembriya Ukrain'skogo shchita. Arkhei* [Geochronology of Ukrainian Shield early Precambrian. Archaean]. Kiev, Naukova dumka, 2005. 243 p. (in Russ.).
 45. Artemenko G. V., Samborskaya I. A., Martynyuk A. V. Geochemical characteristic and geodynamic condition of metabasites and metakomatiites of Kryvbass (Middle-Dnieper megablock of the Ukrainian Shield). *Mineralogichnyi zhurnal = Mineralogical Journal (Ukraine)*, 2015, vol. 37, no. 2, pp. 76–89. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mineral_2015_37_2_9 (accessed: 20.05.2020). (in Russ.).

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>

Холина Наталья Викторовна – 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>

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

Корिश 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>

Червяковская Мария Владимировна – младший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Российская Федерация; E-mail: masha_vuf_91@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7074-5433>

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

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

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>

Natalya V. Kholina – 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>

Alexander V. Samsonov – Dr. habil. in Geol.- Min., Associate Member of the RAS, chief researcher, Institute of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, Russian Federation; E-mail: samsonov@igem.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4101-6159>

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

Maria V. Chervyakovskaya – research fellow, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation; E-mail: masha_vuf_91@mail.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7074-5433>

Nikolay S. Bazikov – PhD in Geol.- Min, associate professor, Department of Mineral Resources and Mineral Management Studies, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; E-mail: nickolasss@yandex.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0847-6498>

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

All authors have read and approved the final manuscript.