

## Редкие и редкоземельные элементы и изотопный состав Hf в цирконе из палеопротерозойских диорит-гранодиоритовых интрузий Курского блока Сарматии как индикаторы их петрогенезиса

©2023 К. А. Савко<sup>1✉</sup>, Е. Х. Кориш<sup>1</sup>, Н. С. Базиков<sup>1</sup>, А. В. Самсонов<sup>2</sup>, М. В. Червяковская<sup>3</sup>

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

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

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

### Аннотация

*Введение:* Lu-Hf изотопия циркона из известково-щелочных диорит-гранодиоритовых интрузий стойло-николаевского комплекса в краевой части Курского блока является важным индикатором петрогенезиса и тектонической обстановки их формирования.

*Методика:* Выполнено изучение Lu-Hf изотопного состава цирконов. Определены содержания Ti, распределение редких и редкоземельных элементов в цирконе.

*Результаты и обсуждение:* Морфологические особенности циркона, отношение Th/U, распределение редкоземельных элементов и высокие температуры кристаллизации по Ti-in-Zrn термометру предполагают его магматическую природу. Изотопный состав Hf свидетельствует о недородных, главным образом, палеоархейских источниках с широким разбросом отрицательных значений  $\epsilon_{\text{Hf}}(T)$  и модельных возрастов.

*Заключение:* Диорит-гранодиоритовые массивы формировались в тыловой магматической дуге древней континентальной окраины.

**Ключевые слова:** Курский блок, Lu-Hf изотопия, циркон, петрогенезис.

*Источник финансирования:* Исследование выполнено при поддержке госбюджетной темой ИГЕМ РАН № 121041500222-4.

*Для цитирования:* Савко К. А., Кориш Е. Х., Базиков Н. С., Самсонов А. В., Червяковская М. В. Редкие и редкоземельные элементы и изотопный состав Hf в цирконе из палеопротерозойских диорит-гранодиоритовых интрузий Курского блока Сарматии как индикаторы их петрогенезиса // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2023. № 1. С. 4–17. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/1/4-17>

### Введение

Циркон ( $\text{ZrSiO}_4$ ) – обычный акцессорный минерал, используемый для расшифровки геологической истории большинства магматических и метаморфических пород [1–3]. Это обусловлено высокой температурой закрытия изотопной системы,

устойчивостью при выветривании, высокотемпературном метаморфизме и анатексисе [2, 4] и возможностью получения оценок возрастов и условий кристаллизации. Изотопный состав Hf, O и Li широко используются при геологических исследованиях [5, 6]. Кроме того, в кристаллическую решетку



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Савко Константин Аркадьевич, e-mail: [ksavko@geol.vsu.ru](mailto:ksavko@geol.vsu.ru)

циркона в значимых количествах входят многие редкие элементы, такие как Ti, Hf, Th, U, Sc, Y, и редкоземельные элементы (РЗЭ), которые являются важными петрогенетическими индикаторами [7–10]. Например, редкие элементы в цирконе используются для оценки температур кристаллизации расплавов [11–13], определения генетических типов гранитоидов [14].

В Курском блоке Сарматии в период 2.10–2.04 млрд лет назад происходила активная перестройка континентальной литосферы и внедрение в кору

огромного объема магм, совмещенных в пространстве и времени. Особое место, как индикатор геодинамической обстановки занимает известково-щелочной диорит-гранодиоритовый магматизм в краевой части архейского Курского блока, вблизи его границы с палеопротерозойским Волго-Донским орогеном (рис. 1). Настоящее исследование сфокусировано на геохимии и Lu-Hf изотопии циркона из диорит-гранодиоритовых интрузий, как индикатора их петрогенезиса и тектонической обстановки образования.

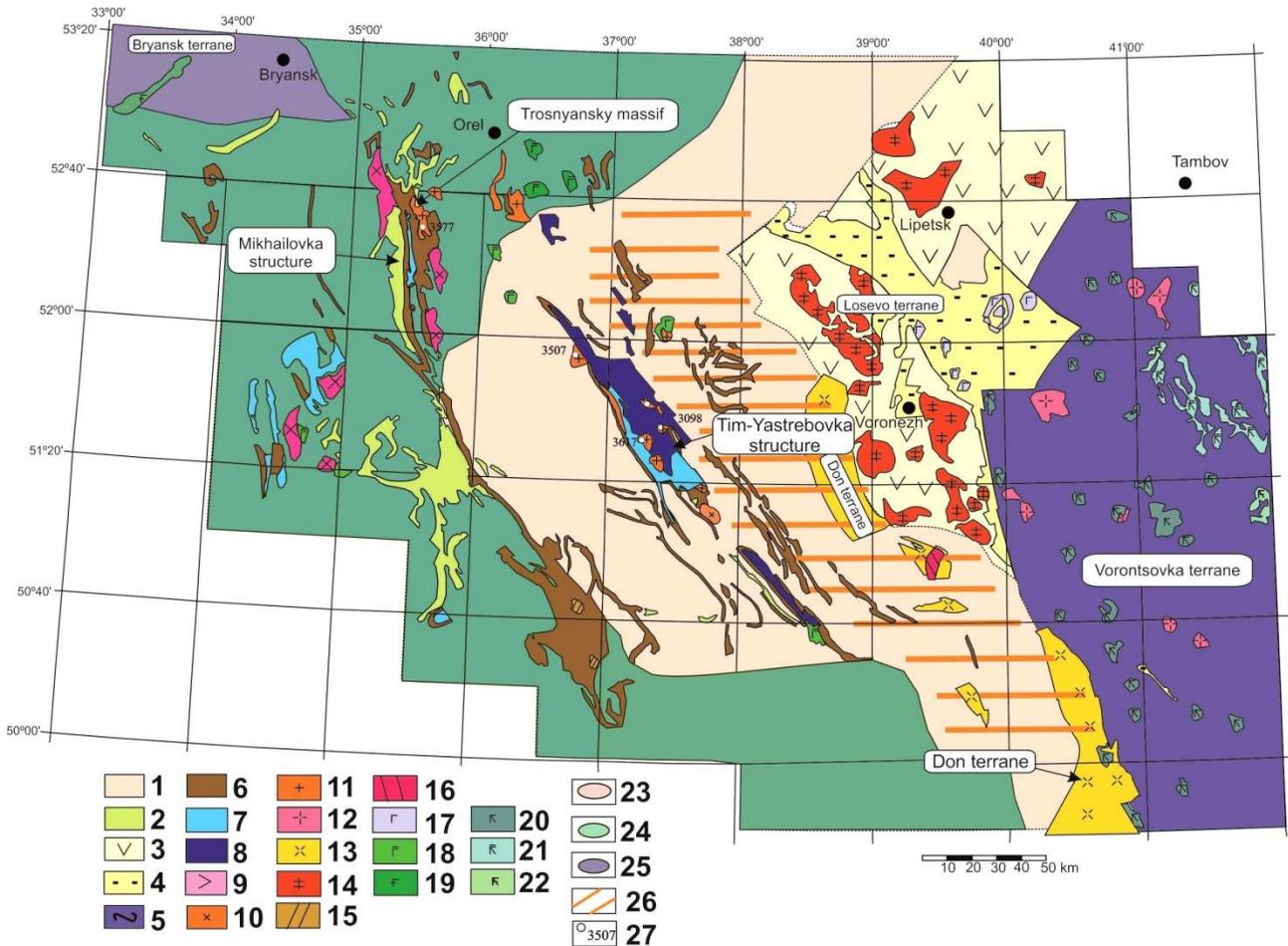


Рис. 1. Схематическая карта Воронежского кристаллического массива.  
[Fig. 1. Schematic geological map of the Voronezh massif.]

### Геологическая позиция

Впервые гранодиориты и диориты в Тим-Ястребовской структуре (ТЯС) Курского блока были объединены в стойло-николаевский комплекс Н.И. Голивкиным в 1962 г. [15]. Разными авторами [16, 17] в состав стойло-николаевского комплекса включались и основные интрузивные породы. Считалось, что все интрузивные породы в ТЯС от кислого до основного состава образовались из одного магматического очага, а их разнообразие обусловлено многократностью внедрения продуктов дифференциации магмы [15]. Основные интрузии изолированы от гранодиоритовых; тем не менее, предполагалось, что

диориты и гранодиориты являются производными ассимиляции метасадочных пород базальтовой магмой в промежуточных очагах [16]. Кроме того, существовала точка зрения, что на рубеже 2.1 млрд лет назад в результате столкновения Сарматии и Волгоуралии произошло закрытие рифтов Курского блока. В условиях сжатия возникли внутрикоровые зоны плавления, и в результате коллизии сформировались гранитоиды стойло-николаевского комплекса [18]. Однако все эти гипотезы в контексте современных представлений об эволюции коры Курского блока в палеопротерозое не подтверждаются.

Изотопно-геохронологические исследования циркона (TIMS) были выполнены для двух проб гранодиоритов из небольших интрузивных тел. Возраст магматизма оценен как 2046–2086 млн лет [19]. По результатам датирования методом SIMS возраст крупных массивов составляет 2.04–2.06 млрд лет [20–22]. На этом основании было сделано предположение о постколлизийной природе диорит-гранодиоритового магматизма в результате кристаллизационной дифференциации базальтовых магм, претерпевших умеренную контаминацию ТТГ-гнейсами [21]. Недавнее датирование циркона и титанита методом ID TIMS показало, что внедрение массивов произошло 2.08–2.07 млрд лет назад, т.е. до коллизии Сарматии и Волгоуралии в надсубдукционной обстановке [23, 24].

В период 2.10–2.04 млрд лет назад палеопротерозойская платформа Курского блока претерпела интенсивную эндогенную переработку, включая магматизм, рифтогенез, складчатость и метаморфизм, которые были связаны с субдукционными и коллизийными процессами в ходе эволюции обрамляющих Курский блок палеопротерозойских Волго-Донского и Ингуло-Севского орогенов (рис. 1) [21, 25–28]. В ходе этих событий был сформирован структурный облик Воронежского массива (рис. 1).

Палеопротерозойские гранодиорит-диоритовые массивы в Курском блоке Сарматии сконцентрированы в палеопротерозойской Тим-Ястребовской структуре (рис. 2), которая, как считалось ранее, имеет внутриконтинентальную рифтовую природу [29]. Значительно реже они встречаются за ее пределами [20]. ТЯС образовалась в период 2.2–2.1 млрд лет назад на палеоархейской коре Курского блока Сарматии [29]. Осадочные породы, в том числе железисто-кремнистые формации (ЖКФ), накопившиеся в интервале 2.5–2.4 млрд лет назад и имевшие площадное распространение, сохранились от эрозии в ТЯС и других палеопротерозойских синформах [25, 29]. Ими выполнены нижние части осадочного разреза. На ЖКФ коробковской свиты и карбонатных отложениях роговской свиты с перерывом и несогласием (15°) залегают углеродистые сланцы и основные вулканы тимской свиты, накопившиеся в пределах ТЯС.

#### Аналитические методики

Изучение Lu-Hf-изотопного состава цирконов выполнено на многоколлекторном масс-спектрометре Neptune Plus с приставкой для лазерной абляции NWR 213 в Институте геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург. Измерения проводились в тех же точках, где были выполнены определения абсолютного возраста на SHRIMP II. Используемое оборудование размещено в помещении класса чистоты 7 ИСО. Проведена оптимизация работы масс-спектрометра и приставки для лазерной абляции, подбор стандартов, отработка процедуры корректировки эффектов фракционирования, дискриминации ионов по массе и изобарических помех  $^{176}\text{Yb}$  и  $^{176}\text{Lu}$  на  $^{176}\text{Hf}$ , оптимизация процедуры

обработки экспериментальных данных с использованием образцов сравнения циркона Mud Tank, GJ-1 [30, 31]. Неопределенность единичного измерения отношения  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  в виде 2SD – в интервале 0.005–0.008 %, единичного определения значения  $\epsilon(\text{Hf})$  в виде 2SD варьировала для перечисленных стандартов в интервале 5–9 %. Параметры процесса лазерной абляции: плотность энергии лазерного излучения – 14 Дж/см<sup>2</sup>, частота повторения импульсов – 20 Гц, диаметр кратера – 25 мкм. Для обработки Lu-Hf данных был использован макрос Hf-INATOR для Excel [32].

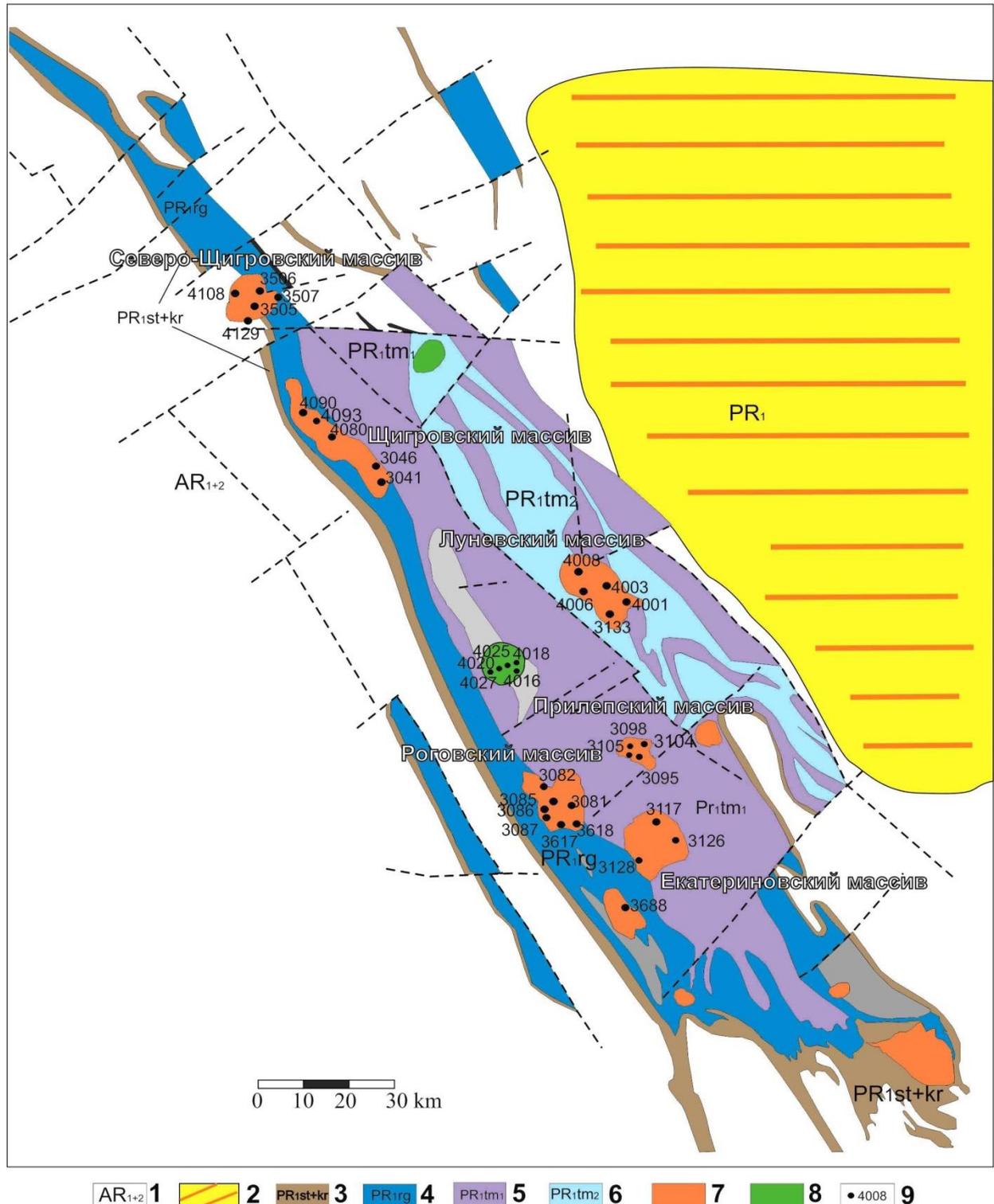
Содержания Ti и других элементов-примесей в цирконах определялись методом вторично-ионной масс-спектрометрии в Ярославском Филиале Физико-Технологического Института РАН (ЯФ ФТИАН РАН) с использованием вторично-ионного микрозонда CAMECA IMS-4F. Методика измерений в основном соответствовала изложенной в [33].

#### Морфология циркона

Циркон в пробе 3617/227.5 из *гранодиорита Роговского массива* представлен в основном бесцветными идиоморфными и субидиоморфными кристаллами, причем присутствуют как длиннопризматические (длиной 150–200 мкм) с острыми пирамидальными вершинами, так и короткопризматические зерна диаметром 100–150 мкм (рис. 3 а). Присутствуют твердофазные включения. В катодоллюминесценции (КЛ) видна структура роста – тонкая концентрическая осцилляционная зональность, 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 практическое отсутствие значительных наложенных событий. Его возраст определен как 2045±15 млн лет [21].

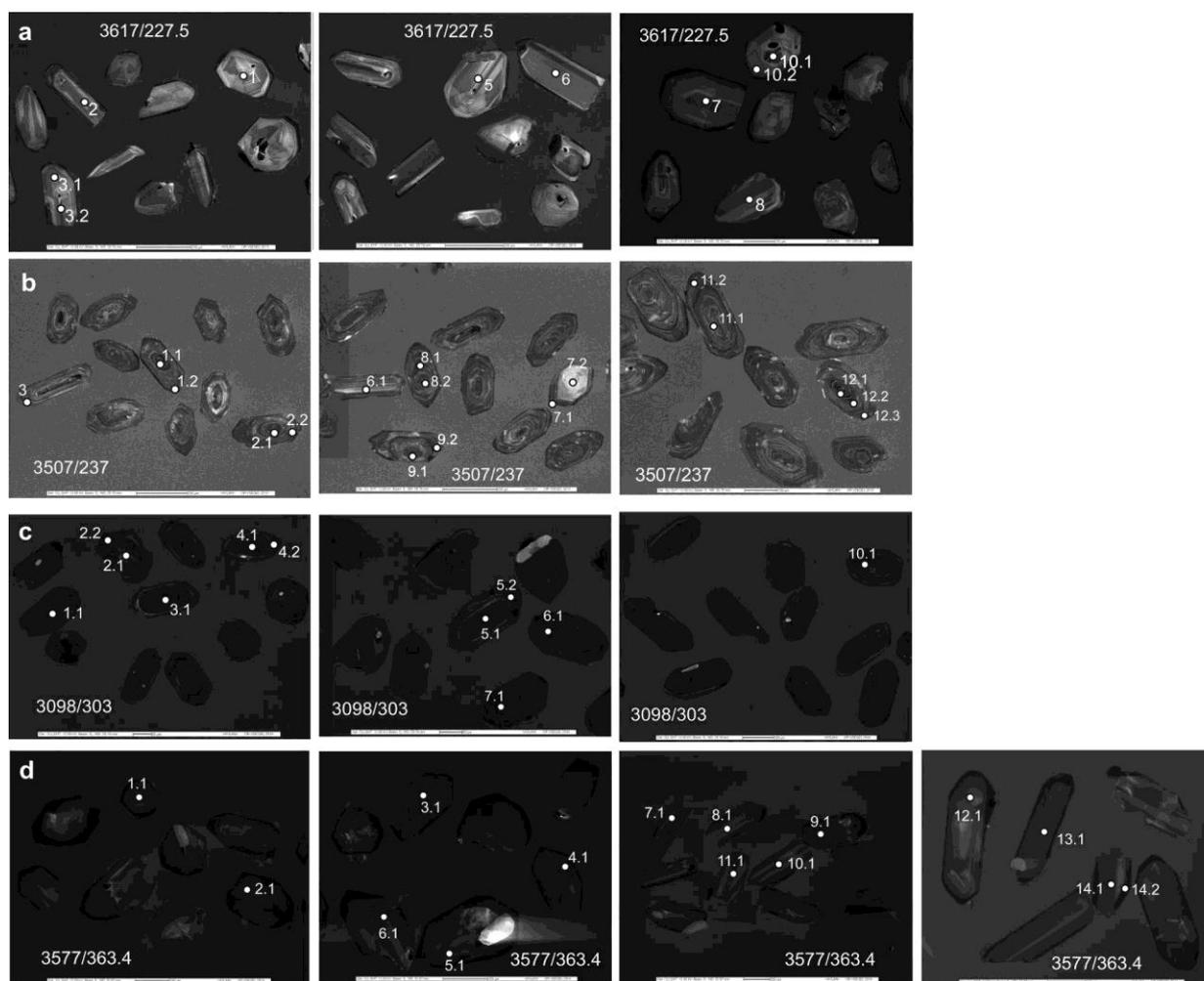
Акцессорные цирконы из *диоритов Северо-Шигровского массива* (проба 3507/237) представлены в основном бесцветными субидиоморфными и идиоморфными короткопризматическими кристаллами размером от 100 до 250 мкм, часто трещиноватыми, а также содержащими включения других минеральных фаз, а также флюидные включения. В КЛ в цирконах отмечается осцилляционная концентрическая зональность (рис. 3 б). Возраст, определенный методом SIMS составляет 2049±10 млн лет [21], методом ID TIMS – 2076±2 млн лет [24].

Циркон в пробе 3098/303 из *гранодиорита Прилепского массива* коричневого и светло-коричневого цвета, полупрозрачный и непрозрачный, представлен идиоморфными и субидиоморфными призматическими непрозрачными зернами, размером 100–300 мкм, с коэффициентом удлинения 1.5–3.0 (рис. 3 с). В КЛ кристаллы имеют двухфазное строение: темная центральная часть с грубой магматической зональностью и более светлая краевая с тонкой осцилляционной концентрической зональностью. Унаследованных ядер не выявлено. Структурные и морфологические признаки указывают на магматическую природу



**Рис. 2.** Схематическая геологическая карта Тим-Ястребовской структуры: 1 – палеоархейские ТТГ (AR<sub>1+2</sub>); 2 – палеопротерозойская активная континентальная окраина; 3 – стоиленская и коробковская свиты курской серии (PR<sub>1st+kr</sub>); 4 – рогововская свита оскольской серии (PR<sub>1rg</sub>); 5 – нижняя подсвита тимской свиты оскольской серии (PR<sub>1tm1</sub>); 6 – верхняя подсвита тимской свиты оскольской серии (PR<sub>1tm2</sub>); 7 – гранодиориты, диориты (PR<sub>1sn</sub>); 8 – габбро (PR<sub>1</sub>); 9 – местоположение и номера пробуренных скважин.

**[Fig. 2.** Schematic geological map of the Tim-Yastrebovka structure: (1) – Paleoarchean TTG (AR<sub>1+2</sub>); (2) – Paleoproterozoic active continental margin; (3) – Stoilo and Korobki formations of the Kursk Group (PR<sub>1st+kr</sub>); (4) – Rogovoe Formation of the Oskol Group (PR<sub>1rg</sub>); (5) – lower member of the Tim Formation of the Oskol Group (PR<sub>1tm1</sub>); (6) – upper member of the Tim Formation of the Oskol Group (PR<sub>1tm2</sub>); (7) – granodiorite, diorite (PR<sub>1sn</sub>); (8) – gabbro (PR<sub>1</sub>); (9) – drill holes. *Inscriptions on the picture: Северо-Шигровский массив – North Shigry Massif, Шигровский массив – Shigry Massif, Луневский массив – Lunevsky Massif, Прилепский массив – Prilepy Massif, Рогововский массив – Rogovoye Massif, Екатериновский массив – Ekaterinovskiy Massif.*]



**Рис. 3.** Катодолуминесцентные снимки зёрен циркона. Номера точек анализов соответствуют таковым в таблицах 1 и 2. [Fig. 3. Cathodoluminescence images of zircon grains. Numbers of analytical points correspond to those in the Table 1 and 2.]

циркона и практически отсутствие значительных наложенных событий. Его возраст оценивается как  $2078 \pm 7$  млн лет [24].

Циркон из *диоритов Троснянского массива* (проба 3577/363.4) представлен прозрачными и полупрозрачными идиоморфными призматическими и изометричными кристаллами размером 150–300 мкм. В режиме катодной люминесценции в циркон темный с осциляционной зональностью и редкими более светлыми ядрами (рис. 3 d). Оценка его возраста составляет  $2058 \pm 5$  млн лет [20].

#### Редкоземельный состав циркона

Концентрации Nb, Hf, Y, Ti и редкоземельных элементов в цирконах из диоритов и гранодиоритов четырех интрузий стойло-николаевского комплекса приведены в табл. 1. Значения Th/U отношения в них значительно превышают 0.1, а отношения U/Yb сильно изменчивы от массива к массиву и находятся в интервале от 0.2 до 5. Содержание Nb в цирконах варьирует от 9 до 95 ppm, причем максимальные содержания отмечаются в диоритах Северо-Щигровского

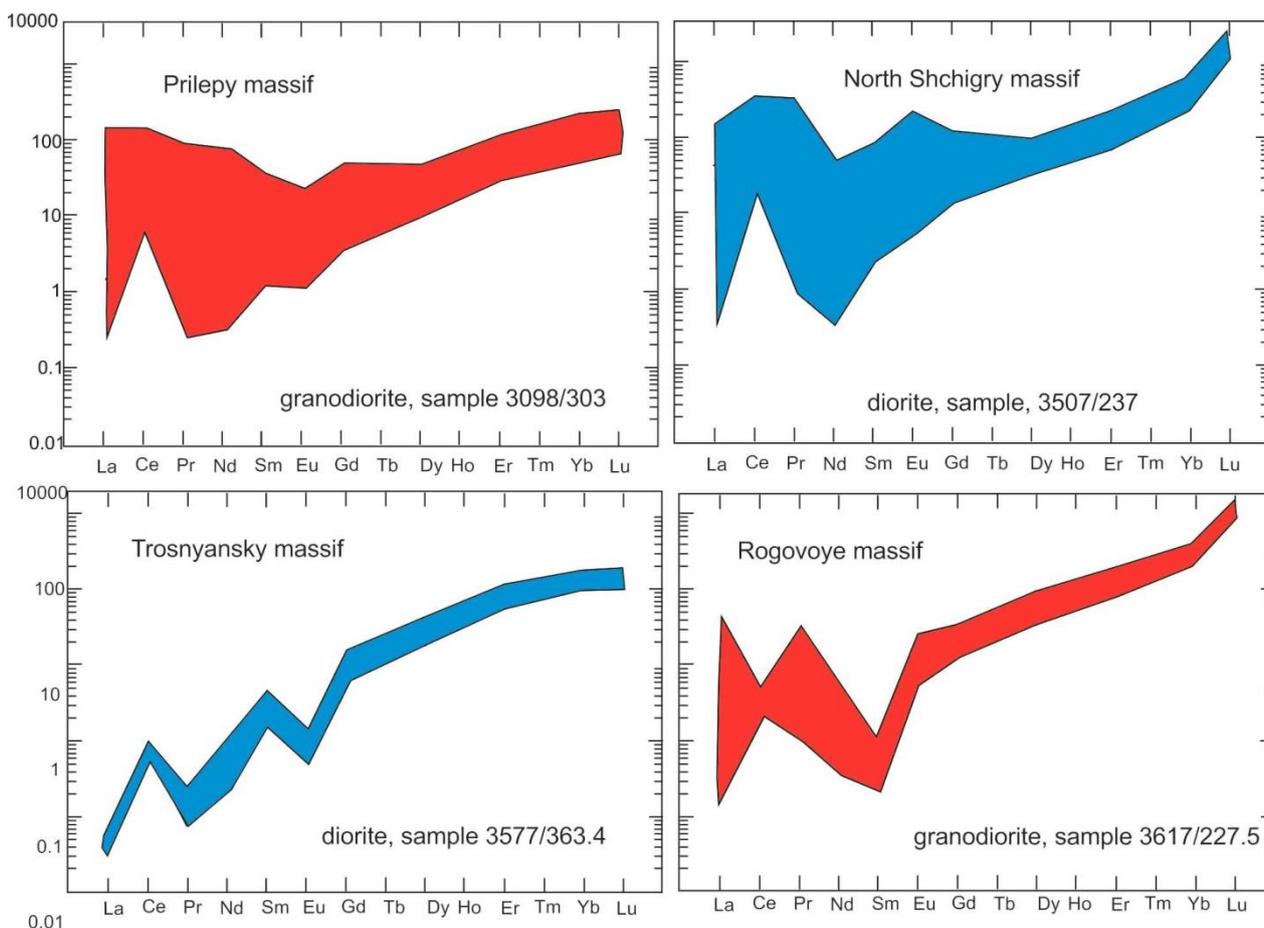
массива (23–95 ppm), а относительно обеднены гранодиориты Прилепской интрузии (9–23 ppm). Наиболее обогащены Y цирконы из гранодиоритов Роговской (11754–25663 ppm) и диоритов Северо-Щигровской (11769–31229 ppm) интрузий. На порядок ниже содержания Y в цирконах из диоритов Троснянского (810–1545 ppm) и гранодиоритов Прилепского (406–1735 ppm) массивов.

Распределение редкоземельных элементов характеризуется сильно фракционированными спектрами тяжелых РЗЭ в цирконе из всех массивов ( $Yb_N/Gd_N$  от 4 до 27, за исключением единичных значений) (рис. 4). Отмечаются резкие положительные аномалии  $Eu^*$  в цирконах Роговского ( $Eu/Eu^* = 2.9-4.0$ ) и Северо-Щигровского массивов ( $Eu/Eu^* = 1.0-2.7$ , умеренно отрицательные в цирконах из Прилепской интрузии ( $Eu/Eu^* = 0.5-1.0$ ) и резко отрицательные в цирконе из пироксеновых диоритов Троснянского массива ( $Eu/Eu^* = 0.16-0.18$ ) (рис. 4). В цирконах из всех интрузий проявлена положительная  $Se^*$  аномалия. В краевых частях нескольких зерен циркона из гранодиоритов Прилепской и диоритов Северо-Щигровской

Таблица 1. Содержание редких и редкоземельных элементов в цирконе из гранитоидов Стойло-Николаевского комплекса Курского блока  
 [Table 1. Representative ion microprobe analyses of trace elements in zircons from granitoids of the Stoilo-Nikolaevsky complex, Kursk block]

Точка [Spot]	Ti	Y	Nb	P	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb	Lu	Hf	Th	U	T <sub>c*</sub>	T <sub>c**</sub>	Eu*	Th/U	(Yb/Gd) <sub>n</sub>	Ce*/Ce*	Pb <sub>N</sub>	U/Yb
Роговский массив, гранодиорит, образец 3617/227.5 [Rogovoye massif, granodiorite, sample 3617/227.5]																										
2.1 core	31.7	22861	32.3	374	0.50	17.4	1.35	3.5	0.82	8.6	69.4	233	332	760	433	10065	173	162	853	867	3.5	1.1	13.2	3.5	14.2	0.21
3.1 core	43.2	23434	25.2	386	1.02	17.0	4.30	8.7	1.30	11.7	85.7	253	338	731	426	9384	157	142	889	905	3.4	1.1	10.3	1.1	45.3	0.19
4.1 core	31.3	16334	46.3	388	1.37	45.5	41.5	26.9	1.22	8.2	59.7	170	246	601	347	10143	138	132	852	866	2.9	1.0	12.2	0.2	43.7	0.22
6.1 core	51.1	21960	35.7	389	18.0	28.9	25.6	26.0	2.15	18.7	93.6	242	315	681	391	9504	151	153	908	926	4.0	1.0	8.8	0.3	26.9	0.22
7.1 core	47.3	23434	22.5	445	1.08	19.1	5.23	9.6	1.38	12.2	91.9	273	366	786	448	9228	200	172	899	916	3.3	1.2	10.3	1.1	55.1	0.22
7.2 rim	35.2	11754	20.1	406	0.64	16.8	1.21	2.2	0.45	4.1	34.8	127	187	453	256	10385	127	146	865	879	3.2	0.9	15.7	3.6	12.7	0.32
9.1	40.2	25663	25.0	457	0.90	20.1	3.55	7.3	1.33	14.0	90.9	285	389	855	468	9973	166	141	880	896	3.9	1.2	11.4	1.6	37.4	0.16
Северо-Ширровский массив, диорит, образец 3507/237 [North Schirgry massif, diorite, sample 3507/237]																										
2.2 rim	40.1	11769	55.8	213	208	1217	169	144	65.7	70.0	141	144	162	470	301	10931	241	522	879	895	2.2	0.5	4.0	1.5	1779	1.1
3.2 rim	21.5	13058	45.1	233	347	2589	409	345	118	125	174	141	167	516	334	12094	465	809	813	823	2.7	0.6	3.6	1.5	4305	1.6
4 core	24.8	14974	58.4	242	120	486	26.6	15.7	5.7	5.0	32.6	129	240	728	457	12010	430	678	828	839	1.1	0.6	27.0	2.0	280	0.93
7.1 core	28.8	31229	61.8	800	86.5	748	78.0	64.6	28.9	37.3	100	291	454	1297	785	10219	696	847	843	856	2.1	0.8	15.7	2.1	821	0.65
7.2 rim	18.4	14744	94.5	279	139	1163	134	113	54.1	57.1	125	165	224	613	381	11621	485	791	798	807	2.1	0.6	5.9	1.9	1411	1.3
9.1 core	32.0	14132	22.8	416	1.09	145	1.15	2.2	4.4	4.2	36.9	135	210	510	296	9899	108	112	855	868	1.0	1.0	16.7	2.9	12.1	0.22
11.2 rim	99.7	18484	49.5	904	471	2830	416	319	161	158	310	247	220	578	367	11746	369	756	994	1020	2.2	0.5	2.3	1.5	4379	1.3
Троеснянский массив, диорит, образец 3577/363.4 [Troesnyanskiy massif, diorite, sample 3577/363.4]																										
1.1 core	22.3	1194	41.8	444	0.1	6.2	0.2	3.0	5.9	0.8	30.0	103.4	189	294	47.7	7840	81.2	204	816	827	0.18	0.4	11.9	8.0	2.1	0.69
2.1 core	14.4	792	22.2	312	0.1	4.0	0.1	1.3	3.0	0.4	15.3	63.1	132	224	37.4	8095	35.0	140	774	781	0.18	0.3	17.7	8.9	1.1	0.63
4.1 core	15.8	823	22.8	236	0.2	6.2	0.1	1.6	3.0	0.4	16.6	67.7	132	218	36.3	7906	64.4	195	783	791	0.17	0.3	15.9	10.7	1.1	0.89
8.1 core	13.9	810	15.8	271	0.1	4.5	0.1	1.5	3.2	0.4	18.3	67.7	138	232	38.1	8206	45.3	149	771	778	0.16	0.3	15.3	10.0	1.1	0.64
10.1 core	14.8	1129	13.8	432	0.1	5.2	0.1	2.0	4.4	0.6	23.0	90.1	183	306	49.8	8033	46.4	180	777	784	0.18	0.3	16.1	11.5	1.1	0.59
11.1 core	13.3	1545	11.1	402	0.1	7.3	0.3	5.7	8.5	1.1	39.1	134.9	243	379	62.5	8138	104	289	767	773	0.18	0.4	11.7	6.7	3.2	0.76
Прилепский массив, гранодиорит, образец 3098/303 [Prilepkiy massif, granodiorite, sample 3098/303]																										
1.1 core	5.4	500	13.3	55.1	4.5	77.6	1.5	8.1	3.4	1.3	13.2	40.5	78.6	160	27.8	8356	388	548	689	691	0.59	0.7	14.7	7.3	15.8	3.4
3.1 core	6.3	745	10.0	131	4.1	70.6	0.7	4.1	3.7	1.2	16.8	57.0	112	229	40.7	7809	346	509	702	704	0.47	0.7	16.5	9.4	7.4	2.2
5.1 core	8.1	1735	12.4	124	12.5	170	8.5	48.3	15.7	5.5	54.0	147	269	472	78.1	8992	965	1012	723	726	0.58	1.0	10.6	3.9	89.5	2.1
5.2 rim	-	1212	25.2	98.8	121	675	56.2	31.0	56.7	13.1	120	134	191	292	46.7	7106	3152	1498	-	-	0.49	2.1	2.9	2.0	592	5.1
6.1 core	18.0	1068	13.4	77.7	115	373	26.3	84.5	12.9	9.5	38.9	93.0	173	314	51.8	8002	707	704	795	804	1.30	1.0	9.8	1.6	27.7	2.2
8.1 core	10.8	920	8.9	96.5	1.8	46.5	0.6	6.8	7.9	2.4	29.8	80.6	135	243	39.1	7238	296	319	748	753	0.48	0.9	9.9	10.9	6.3	1.3
8.2 rim	5.3	406	10.5	1.2	0.8	52.6	0.3	1.8	2.3	0.8	9.3	30.5	59.9	124	21.9	8491	282	459	688	690	0.53	0.6	16.1	26.3	3.2	3.7
9.1 core	22.3	524	9.9	115	6.4	70.7	2.6	14.6	5.8	1.9	17.0	43.9	77.0	144	23.3	6492	326	350	817	827	0.58	0.9	10.2	4.3	27.4	2.4
9.2 rim	18.8	435	9.9	n.d.	443.2	1149	111	467	75.2	16.5	126.2	46.9	62.9	112	21.7	7837	197	348	800	809	0.52	0.6	1.1	1.2	1168	3.2

\* Ti in Zr калибровка по [12] \*\* Ti in Zr калибровка по [13]  
 [\* Ti in Zr Calibration of [12] \*\* Ti in Zr Calibration of [13]]



**Рис. 4.** Нормализованное к хондриту распределение РЗЭ в цирконах.  
**[Fig. 4.** Chondrite-normalized REE patterns for zircons.]

интрузий отмечается обогащение легкими РЗЭ (LREE). Содержания Ti широко варьируют от 5 до 22.3 ppm в цирконах из гранодиоритов Прилепской интрузии до 18–100 ppm в цирконах из диоритов Северо-Щигровской интрузии (табл. 1).

#### Изотопный состав Hf в цирконе

Наиболее радиогенным составом Hf характеризуются цирконы из гранодиоритов Прилепского [ $\epsilon_{\text{Hf}}(\text{T}) = -1,5 - (-5,8)$ ] массива (табл. 2). В остальных массивах циркон характеризуется низкорadiогенным составом Hf: в Роговском массиве  $\epsilon_{\text{Hf}}(2045) = -8,0 - (-19,7)$ , в Северо-Щигровском  $\epsilon_{\text{Hf}}(2049) = -13,9 - (-21,6)$  и в Троснянском  $\epsilon_{\text{Hf}}(2045) = -10,1 - (-15,4)$ . Модельные возрасты, рассчитанные по двухстадийной модели ( $T_c$ ) для циркона из Прилепского массива мезоархейские, а для цирконов из остальных массивов – палеоархейские и даже эоархейские (табл. 2).

#### Обсуждение результатов

##### Петрогенезис

Морфологические особенности циркона, такие как призматический облик, хорошо выраженная осцилляционная зональность (рис. 3) предполагают магматическую природу циркона. Th/U отношение также используют для определения генезиса циркона [3]. Счи-

тается, что цирконы с  $\text{Th}/\text{U} > 0.1$  имеют магматическое происхождение, в отличие от метаморфического с  $\text{Th}/\text{U} < 0.1$  [34]. В цирконах из всех диорит-гранодиоритовых массивов значения Th/U отношения значительно превышают 0.1. Кроме того, цирконы из диорит-гранодиоритовых массивов имеют характерное для магматических цирконов нормализованное к хондриту на спайдер-диаграммах распределение РЗЭ, когда отмечается резкое обогащение тяжелыми редкоземельными элементами (HREE) относительно легких и средних (MREE) с положительными  $\text{Ce}^*$  и отрицательными  $\text{Eu}^*$  аномалиями [3, 7] (рис. 4). Типичные магматические цирконы имеют  $(\text{Yb}/\text{Gd})_N > 10$ ,  $(\text{Sm}/\text{La})_N > 5$ ,  $\text{Ce}/\text{Ce}^* > 2.5$ .

Концентрации Ti в цирконе являются популярным термометром кристаллизации магматических расплавов [12, 13]. Высокие температуры кристаллизации циркона во всех массивах (690–1020 °C) (табл. 1) еще раз подтверждают его магматическую природу. Циркон из гранодиоритов Роговского и диоритов Северо-Щигровского массивов кристаллизовался при наиболее высоких температурах ( $> 800$  °C). Более низкие температуры кристаллизации ( $< 800$  °C) имеют цирконы из гранодиоритов Прилепского и диоритов Троснянского массивов. Умеренные концентрации Hf, Th и U в цирконе (табл. 1) свидетельствуют о его

Таблица 2. Lu-Hf изотопный состав циркона из гранитоидов Стоило-Николаевского комплекса  
 [Table 2. Lu-Hf isotopic composition of zircons from the Stoilo-Nikolaevsky complex granitoids]

Точка [Spot]	Возраст (млн. лет) [Age (Ma)]	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{178}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\pm 2\sigma$	*T <sub>DM</sub>	*T <sub>C</sub>
Роговский массив, гранодиорит, проба 3617/227.5 [Rogovo massif, granodiorite, sample 3617/227.5]														
2.1	2045	0.024674	0.000283	0.000823	0.000010	0.281102	0.000048	1.467036	0.000099	0.281070	-14.6	1.7	2977	3568
3.1	2045	0.020810	0.000633	0.000678	0.000017	0.281282	0.000110	1.467314	0.000201	0.281256	-8.0	3.9	2723	3154
4.1	2045	0.013194	0.000193	0.000461	0.000006	0.281089	0.000047	1.467190	0.000111	0.281071	-14.5	1.7	2967	3551
5.1	2045	0.017445	0.000077	0.000610	0.000003	0.281024	0.000054	1.467221	0.000087	0.281000	-17.1	1.9	3066	3713
6.1	2045	0.021115	0.000388	0.000708	0.000015	0.280954	0.000060	1.467342	0.000115	0.280926	-19.7	2.1	3168	3879
7.1	2045	0.020326	0.000217	0.000675	0.000006	0.281106	0.000052	1.467172	0.000142	0.281080	-14.2	1.8	2961	3542
7.2	2045	0.022199	0.000179	0.000721	0.000002	0.281064	0.000064	1.467236	0.000109	0.281036	-15.8	2.3	3021	3639
9.1	2045	0.019272	0.000653	0.000671	0.000019	0.281086	0.000047	1.467242	0.000087	0.281060	-14.9	1.7	2987	3584
10.1	2045	0.019154	0.000426	0.000671	0.000014	0.281077	0.000047	1.467120	0.000085	0.281051	-15.2	1.7	2999	3604
Северо-Цирковский массив, диорит, проба 3507/237 [North Schiguy massif, diorite, sample 3507/237]														
1.1	2049	0.065167	0.005791	0.001692	0.000128	0.281067	0.000061	1.467334	0.000123	0.281001	-16.9	2.1	3088	3757
2.2	2049	0.019935	0.000345	0.000638	0.000009	0.281007	0.000053	1.467354	0.000100	0.280982	-17.6	1.9	3087	3751
4.1	2049	0.032393	0.000257	0.001054	0.000006	0.281127	0.000065	1.467328	0.000137	0.281086	-13.9	2.3	2961	3540
7.1	2049	0.019825	0.000402	0.000844	0.000020	0.281035	0.000098	1.467357	0.000206	0.281002	-16.9	3.5	3066	3716
7.2	2049	0.019043	0.000112	0.000580	0.000002	0.281054	0.000061	1.467274	0.000107	0.281031	-15.8	2.2	3028	3640
8.2	2049	0.032233	0.000275	0.001046	0.000007	0.280909	0.000057	1.467122	0.000135	0.280868	-21.6	2.0	3255	4021
9.1	2049	0.030468	0.000702	0.000950	0.000018	0.281057	0.000062	1.467293	0.000108	0.281020	-16.2	2.2	3045	3681
1.1	2058	0.013158	0.000165	0.000464	0.000028	0.281080	0.000028	1.467200	0.000062	0.281062	-14.6	1.0	2981	3563
Прилепский массив, гранодиорит, проба 3098/303 [Prilepy massif, granodiorite, sample 3098/303]														
1.1	2078	0.016271	0.000625	0.000535	0.000034	0.281346	0.000034	1.467233	0.000074	0.281324	-4.8	1.2	2628	2977
3.1	2078	0.015963	0.000416	0.000533	0.000047	0.281380	0.000047	1.467164	0.000114	0.281359	-3.5	1.7	2581	2900
4.1	2078	0.014568	0.001294	0.000461	0.000045	0.281435	0.000045	1.467246	0.000100	0.281417	-1.5	1.6	2503	2772
5.1	2078	0.027782	0.001377	0.000848	0.000078	0.281364	0.000078	1.467415	0.000167	0.281333	-4.6	2.8	2625	2971
5.2	2078	0.031695	0.000657	0.000947	0.000060	0.281340	0.000060	1.467391	0.000109	0.281303	-5.5	2.1	2664	3035
6.1	2078	0.015101	0.000731	0.000510	0.000034	0.281342	0.000034	1.467319	0.000083	0.281322	-4.9	1.2	2631	2982
7.1	2078	0.017841	0.000675	0.000599	0.000041	0.281332	0.000041	1.467260	0.000090	0.281308	-5.3	1.4	2651	3015
8.1	2078	0.019085	0.000311	0.000628	0.000031	0.281355	0.000031	1.467284	0.000068	0.281331	-4.5	1.1	2621	2966
8.2	2078	0.008422	0.000069	0.000295	0.000037	0.281358	0.000037	1.467335	0.000090	0.281346	-4.0	1.3	2596	2924
9.1	2078	0.018500	0.000531	0.000660	0.000029	0.281362	0.000029	1.467177	0.000064	0.281336	-4.4	1.0	2614	2954
9.2	2078	0.006729	0.000339	0.000247	0.000029	0.281317	0.000029	1.467253	0.000062	0.281307	-5.4	1.0	2648	3009
10.1	2078	0.013656	0.000353	0.000474	0.000037	0.281314	0.000037	1.467184	0.000087	0.281295	-5.8	1.3	2667	3040

Продолжение Табл. 2  
[Continued Table 2]

Троснянский массив, диорит, проба 3577/363.4 [Trosnyanka massif, diorite, sample 3577/363.4]														
1.1	2058	0.013158	0.000165	0.000464	0.000028	0.281080	0.000028	1.467200	0.000062	0.281062	-14.6	1.0	2981	3563
2.1	2058	0.021555	0.000639	0.000767	0.000024	0.281193	0.000024	1.467224	0.000086	0.281163	-11.0	0.9	2849	3553
3.1	2058	0.017701	0.000535	0.000632	0.000031	0.281213	0.000031	1.467162	0.000084	0.281188	-10.1	1.1	2812	3293
4.1	2058	0.017610	0.000095	0.000646	0.000034	0.281045	0.000034	1.467391	0.000081	0.281020	-16.1	1.2	3052	3663
5.1	2058	0.024461	0.000222	0.000862	0.000029	0.281169	0.000029	1.467250	0.000073	0.281135	-11.9	1.0	2894	3417
6.1	2058	0.022490	0.000555	0.000811	0.000034	0.281167	0.000034	1.467223	0.000112	0.281135	-11.9	1.2	2880	3415
7.1	2058	0.011637	0.000495	0.000425	0.000036	0.281120	0.000036	1.467309	0.000076	0.281103	-13.1	1.3	2922	3471
8.1	2058	0.014148	0.000139	0.000523	0.000024	0.281115	0.000024	1.467307	0.000056	0.281095	-13.4	0.8	2934	3494
9.1	2058	0.030167	0.000446	0.000998	0.000038	0.281078	0.000038	1.467196	0.000082	0.281039	-15.4	1.4	3025	3635
10.1	2058	0.021037	0.000408	0.000737	0.000031	0.281148	0.000031	1.467261	0.000074	0.281119	-12.5	1.1	2909	3448
11.1	2058	0.022940	0.000450	0.000806	0.000025	0.281088	0.000025	1.467221	0.000061	0.281056	-14.7	0.9	2995	3589

\*Примечание: первичное отношение изотопов гафния  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  рассчитано с использованием константы распада  $^{176}\text{Lu}$   $\lambda = 1,867 \cdot 10^{-11}$ ;  $T_C$  – модельный возраст (млн. лет) источника, рассчитанный по двухстадийной модели с использованием  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0,015$ , основанной на выплавлении магмы из средней континентальной коры, образованной из деплетированной мантии.

[\*Note: initial  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  isotopic ratio calculated using  $^{176}\text{Lu}$   $\lambda = 1,867 \cdot 10^{-11}$  decay constant;  $T_C$  – melt source model age (Ma) calculated using two-stage model with  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0,015$ , based on the magma melting from the continental crust, derived from the depleted mantle]

кристаллизации в составе ликвидусной ассоциации на самой ранней стадии эволюции материнского расплава в промежуточных камерах. Это подтверждается высокими температурами кристаллизации циркона, рассчитанными по Ti-термометру. Отрицательные Eu аномалии в цирконе из диоритов Троснянского (Eu/Eu\* = 0.16–0.18) и гранодиоритов Прилепского (Eu/Eu\* = 0.47–0.59) массивов (рис. 4) могут предполагать, что его кристаллизация происходила одновременно с кристаллизацией плагиоклаза, который является главным концентратом Eu в гранитоидных магмах. Присутствие на ликвидусе плагиоклаза указывает, что расплав имел низкие содержания воды и начал кристаллизоваться в низкобарических условиях. В цирконах из Роговского и Щигровского массивов, напротив, отмечается положительная Eu аномалия, что свидетельствует о кристаллизации циркона на ликвидусе до кристаллизации плагиоклаза. Это подтверждается его более высокими температурами кристаллизации. Обогащение LREE краевых частей нескольких зерен циркона из Прилепской интрузии можно интерпретировать как результат ранней кристаллизации из расплава с высокими значениями отношения LREE/HREE и удалении из него биотита, полевого шпата и роговой обманки [1, 9].

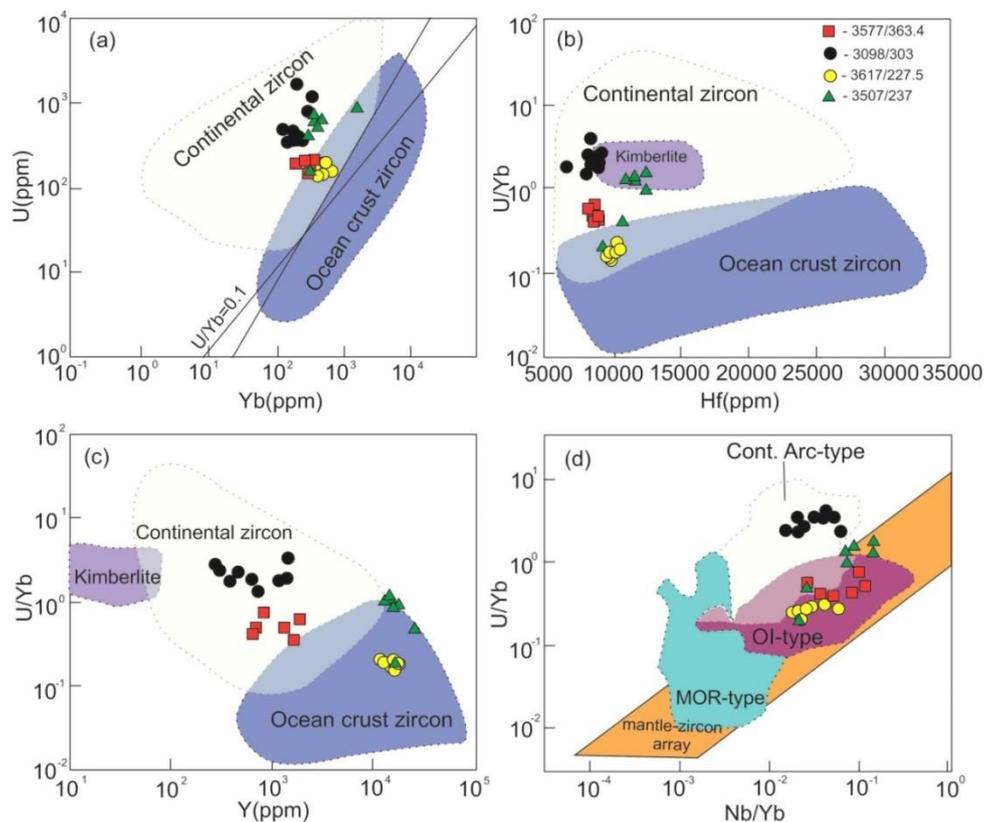
#### Тектоническая обстановка

Изотопный состав Hf в цирконе свидетельствует о неоднородных древних, главным образом, палеоархейских источниках с широким разбросом модельных возрастов, что подтверждается низкорациогенным изотопным составом Nd в породах Роговского, Северо-Щигровского и Троснянского массивов [20, 21]. Таким образом, они формировались в коровых промежуточных очагах и имеют длительную коровую предысторию.

Отношение U/Yb в цирконе служит для определения тектонических обстановок образования магм. Например, значения U/Yb отношения в диапазоне от 0.1 до 4 типично для магматических дуг, сформировавшихся на континентальной коре, а менее 0.1 характерно для мантийных источников [35]. Исходя из этого, для дискриминации тектонических обстановок используются диаграммы Nb/Yb – U/Yb [10]. Составы цирконов из диорит-гранодиоритовых массивов Курского блока имеют высокие значения U/Yb отношения и умеренные Nb/Yb. На дискриминантных диаграммах фигуративные точки их составов попадают в поля континентальных магматических дуг (рис. 5). Эти выводы согласуются с изотопно-геохимическими данными, супрасубдукционной природой и формированием их в задуговом бассейне (back-arc) на мощной архейской континентальной литосфере.

#### Выводы

1. Цирконы из палеопротерозойских диорит-гранодиоритовых интрузий Курского блока с возрастом около 2.07 млрд лет имеют магматический генезис и высокие температуры кристаллизации.



**Рис. 5.** Составы цирконов из гранитоидов стойло-николаевского комплекса на дискриминантных диаграммах тектоно-магматических источников для магматических цирконов: (a) U (ppm) – Yb (ppm); (b) U/Yb – Hf (ppm); (c) U/Yb – Y (ppm); (d) U/Yb – Nb/Yb. Поля «Континентальный цирон», «Циркон океанической коры» и «Кимберлит» на рисунках (a), (b) и (c) по [35]; поля цирконов срединно-океанических хребтов (“MOR-type”), океанических островных дуг (“OI-type”) и континентальных островных дуг (“Cont. Arc-type”) по [10].

**[Fig. 5.** Plots of the zircons from the granitoids of Stoilo-Nikolaevsky complex on the: (a) U (ppm) versus Yb (ppm); (b) U/Yb versus Hf (ppm); (c) U/Yb versus Y (ppm), and (d) U/Yb versus Nb/Yb discriminate the tectono-magmatic sources of the igneous zircons. The compositional variations in “Continental zircon”, “Oceanic crust zircon”, and “Kimberlite” shown in (a), (b), and (c) are in accordance with the study by [35], respectively; variations in “mid-ocean ridge (MOR-type)”, “ocean-island (OI-type)”, and “continental arc (Cont. Arc-type)” in (d) are in accordance with the study by [10].]

2. Изотопный состав Hf в цирконе свидетельствует о неоднородных древних, главным образом, палеоархейских источниках пород, которые и имеют длительную коровую предысторию.

3. Диорит-гранодиоритовые массивы формировались в тыловой магматической дуге (back-arc) на мощной древней континентальной литосфере.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. El-Bialy M.Z., Ali K.A. Zircon trace element geochemical constraints on the evolution of the Ediacaran (600–614 Ma) post-collisional Dokhan Volcanics and Younger Granites of SE Sinai, NE Arabian-Nubian Shield // *Chem. Geol.* 2013. Vol. 360. P. 54–73. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.10.009
2. Grimes C.B., John B.E., Cheadle M.J., Mazdab F.K., Wooden J. L., Swapp S., Schwartz J.J. On the occurrence, trace element geochemistry, and crystallization history of zircon from in situ ocean lithosphere // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2009. Vol. 158. No. 6. P. 757–783. DOI: 10.1007/s00410-009-0409-2

3. Hoskin P.W.O., Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis // *Zircon, Eds. Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O.* Washington, DC, Mineralogical Society America, 2003. Vol. 53. P. 27–62. DOI: 10.2113/0530027
4. Harrison T.M., Watson E.B., Aikman A.B. Temperature spectra of zircon crystallization in plutonic rocks // *Geology.* 2007. Vol. 35. No. 7. P. 635–638. DOI: 10.1130/g23505a.1
5. Zhang C., Liu D.D., Zeng J.H., Jiang S., Luo Q., Kong X.Y., Liu L.F. Nd–O–Hf isotopic decoupling in S-type granites: Implications for ridge subduction // *Lithos.* 2019. Vol. 332. P. 261–273. DOI: 10.1016/j.lithos.2019.03.009
6. Zhang C., Santosh M., Luo Q., Jiang S., Liu L., Liu D. Impact of residual zircon on Nd–Hf isotope decoupling during sediment recycling in subduction zone // *Geoscience Frontiers.* 2019. Vol. 10. No. 1. P. 241–251. DOI: 10.1016/j.gsf.2018.03.015
7. Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2002. Vol. 143. No. 5. P. 602–622. DOI: 10.1007/s00410-002-0364-7
8. Aoki S., Aoki K., Tsujimori T., Sakata S., Tsuchiya Y. Oceanic arc subduction, stagnation, and exhumation: Zircon U–Pb geochronology and trace-element geochemistry of the Sanbagawa eclogites in central Shikoku, SW Japan // *Lithos.* 2020. Vol. 105378. P. 358–359. DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105378

9. Niu L., Hong T., Xu X.-W., Wang X.-H., Li H., Ke Q., Ma Y.-C. Geochronology and trace elements of zircon in the Southern Chinese Altay: Implications for tectonic setting // *Geol. J.* 2021. Vol. 56. No. 7. P. 3605–3625. DOI: 10.1002/gj.4120
10. Grimes C.B., Wooden J.L., Cheadle M.J., John B.E. "Fingerprinting" tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2015. Vol. 170. No. 46. DOI: 10.1007/s00410-015-1199-3
11. Ewing T.A., Hermann J., Rubatto D. The robustness of the Zr-in-rutile and Ti-in-zircon thermometers during high-temperature metamorphism (Ivrea-Verbano Zone, northern Italy) // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2013. Vol. 165. No. 4. P. 757–779. DOI: 10.1007/s00410-012-0834-5
12. Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2006. Vol. 151. No. 4. P. 413–433. DOI: 10.1007/s00410-006-0068-5
13. Ferry J.M., Watson E.B.. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2007. Vol. 154. No. 4. P. 429–437. DOI: 10.1007/s00410-007-0201-0
14. Wang Q., Zhu D.C., Zhao Z.D., Guan Q., Zhang X.Q., Sui Q.L., Mo X.X. Magmatic zircons from I-, S- and A-type granitoids in Tibet: Trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study // *Journal of Asian Earth Sciences.* 2012. Vol. 53. P. 59–66. DOI: 10.1016/j.jseas.2011.07.027
15. Голикин Н.И. Петрография и петрохимия пород стойло-николаевского габбро-диоритового комплекса // *Материалы по геологии и полезным ископаемым центральных районов европейской части СССР.* М., 1962. Вып. V. С. 25–33.
16. Крестин Е.М., Леоненко Е.И. Петрология и потенциальная рудоносность габбро-диорит-гранодиоритовой формации раннего докембрия КМА // *Изв. вузов, геол. и разв.* 1978. № 8. С. 33–45.
17. Чернышов Н.М., Бочаров В.Л., Молотков С.П. Магматические формации и рудоносность раннего докембрия ВКМ // *«Петрология и металлогения магматических и метаморфических комплексов КМА и смежных районов»:* Воронеж, Изд-во Воронеж. гос. ун-та. 1983. С. 3–49.
18. Холин В.М. Геология, геодинамика и металлогеническая оценка раннепротерозойских структур КМА: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Воронеж, 2001. 24 с.
19. Артеменко Г.В. Геохронологическая корреляция вулканизма и гранитоидного магматизма юго-восточной части Украинского щита и Курской магнитной аномалии // *Геохимия и рудообразование.* 1995. Вып. 21. С. 129–154.
20. Кориш Е.Х., Савко К.А., Самсонов А.В., Червяковская М.В. Палеопротерозойские диориты Троснянского массива Курского блока Сарматии: U-Pb возраст, изотопная систематика и источники расплавов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2020. № 1. С. 87–99. DOI: 10.17308/geology.2020.1/2517
21. Савко К.А., Самсонов А.В., Базиков Н.С., Козлова Е.Н. Палеопротерозойские гранитоиды Тим-Ястребовской структуры Воронежского кристаллического массива: геохимия, геохронология и источники расплавов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2014. № 2. С. 56–78. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2014/02/2014-02-09.pdf> (дата обращения: 18.01.2023)
22. Савко К.А., Кориш Е.Х., Базиков Н.С., Цыбуляев С.В., Червяковский В.С., Холина Н.В., Хуссейн И. Палеопротерозойские гранодиориты I-типа Луневского массива в Курском блоке Сарматии: U-Pb возраст, изотопная систематика и источники расплавов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2021. № 4. С. 4–23. DOI: 10.17308/geology.2021.4/3787
23. 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 Res.* 2018. Vol. 311. P. 1–23. DOI: 10.1016/j.precamres.2018.04.009
24. Кориш Е.Х., Савко К.А., Сальникова Е.Б., Самсонов А.В., Иванова А.А., Ларионов А.Н., Цыбуляев С.В. Палеопротерозойский диорит-гранодиоритовый магматизм Курского блока Сарматии: расшифровка сближенных во времени геологических событий // *Труды Карельского научного центра РАН.* 2022. № 5. С. 60–63. DOI: 10.17076/geo1655
25. 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
26. 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 // *Precam. Res.* 2016. V. 287. P. 48–72. DOI: 10.1016/j.precamres.2016.10.015
27. 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. P. 86–99. DOI: 10.1144/jgs2017-017
28. 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 // *Precam. Res.* 2020. Vol. 346. 105790. DOI: 10.1016/j.precamres.2020.105790
29. 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
30. Black L.P., Gulson B.L. The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways Range, Northern Territory // *J. Austral. Geol. Geophys.* 1978. Vol. 3. P. 227–232.
31. 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. P. 47–69. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2004.06.017
32. Giovanardi T., Lugli, F. The Hf-INATOR: a free data reduction spreadsheet for Lu/Hf isotope analysis // *Earth Sci. Informat.* 2017. P. 1–7. DOI: 10.1007/s12145-017-0303-9
33. Терентьев Р.А., Савко К.А. Геохимия цирконов из метаплагиориолитов и трондьемитов Лосевской структурно-формационной зоны Воронежского кристаллического массива // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2015. № 2. С. 53–62. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2015/02/2015-02-08.pdf> (дата обращения: 18.01.2023)
34. Rubatto D. Zircon: The metamorphic mineral // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry.* 2017. Vol. 83. No. 1. P. 261–295. DOI: 10.2138/rmg.2017.83.9
35. Grimes C.B., John B.E., Kelemen P.B., Mazdab F.K., Wooden J.L., Cheadle M.J., Hangehøj K., Schwartz J.J. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: a method for distinguishing detrital zircon provenance // *Geology.* 2007. Vol. 35. P. 643–646. DOI: 10.1130/G23603A.1

**Trace and Rare Earth elements and Hf isotopic composition of zircons  
from the Paleoproterozoic diorite-granodiorite plutons  
of the Kursk block, Sarmatia as their petrogenesis indicators**

©2023 K. A. Savko<sup>1</sup>✉, E. Kh. Korish<sup>1</sup>, N. S. Bazikov<sup>1</sup>, A. V. Samsonov<sup>2</sup>, M. V. Chervyakovskaya<sup>3</sup>

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

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

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

**Abstract**

*Introduction:* Lu-Hf isotopic composition of zircons from the calc-alkaline diorite-granodiorite plutons of the Stoilo-Nikolaevsky complex in the Kursk block is an important indicator of the petrogenesis and tectonic environment of their formation.

*Methodology:* We carried out the study of Lu-Hf isotopic composition of zircons and the analysis of the Ti and other elements concentrations.

*Results and discussion:* Morphological features, Th/U ratio, rare earth elements distribution and high crystallization temperatures according to the Ti-in-Zrn thermometer are the evidences of its magmatic nature. Isotopic Hf composition is the evidence of heterogeneous, primarily Paleoarchean sources with wide variations of the  $\epsilon_{\text{Hf}}(\text{T})$  values and model ages.

*Conclusion:* Diorite-granodiorite massifs were formed in the back-arc environment on the thickened ancient continental margin.

**Keywords:** Kursk block, Lu-Hf isotopy, zircon, petrogenesis.

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

*For citation:* Savko K. A., Korish E. Kh., Bazikov N.S., Samsonov A.V., Chervyakovskaya M.V. Trace and Rare Earth elements and Hf isotopic composition of zircons from the Paleoproterozoic diorite-granodiorite plutons of the Kursk block, Sarmatia as their petrogenesis indicators // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 1, pp. 4–17. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/1/4-17>

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

**REFERENCES**

1. El-Bialy M.Z., Ali K.A. Zircon trace element geochemical constraints on the evolution of the Ediacaran (600–614 Ma) post-collisional Dokhan Volcanics and Younger Granites of SE Sinai, NE Arabian-Nubian Shield. *Chem. Geol.*, 2013, vol. 360, pp. 54–73. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.10.009

2. Grimes C.B., John B.E., Cheadle M.J., Mazdab F.K., Wooden J. L., Swapp S., Schwartz J.J. On the occurrence, trace element geochemistry, and crystallization history of zircon from in situ ocean lithosphere. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2009, vol. 158, no. 6, pp. 757–783. DOI: 10.1007/s00410-009-0409-2



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Konstantin A. Savko, e-mail: [ksavko@geol.vsu.ru](mailto:ksavko@geol.vsu.ru)

3. Hoskin P.W.O., Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Zircon, Eds. Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O.* Washington, DC, Mineralogical Society America, 2003, vol. 53, pp. 27–62. DOI: 10.2113/0530027
4. Harrison T.M., Watson E.B., Aikman A.B. Temperature spectra of zircon crystallization in plutonic rocks. *Geology*, 2007, vol. 35, no. 7, pp. 635–638. DOI: 10.1130/g23505a.1
5. Zhang C., Liu D.D., Zeng J.H., Jiang S., Luo Q., Kong X.Y., Liu L.F. Nd–O–Hf isotopic decoupling in S-type granites: Implications for ridge subduction. *Lithos*, 2019, vol. 332, pp. 261–273. DOI: 10.1016/j.lithos.2019.03.009
6. Zhang C., Santosh M., Luo Q., Jiang S., Liu L., Liu D. Impact of residual zircon on Nd–Hf isotope decoupling during sediment recycling in subduction zone. *Geoscience Frontiers*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 241–251. DOI: 10.1016/j.gsf.2018.03.015
7. Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2002, vol. 143, no. 5, pp.602–622. DOI: 10.1007/s00410-002-0364-7
8. Aoki S., Aoki K., Tsujimori T., Sakata S., Tsuchiya Y. Oceanic arc subduction, stagnation, and exhumation: Zircon U–Pb geochronology and trace-element geochemistry of the Sanbagawa eclogites in central Shikoku, SW Japan. *Lithos*, 2020, vol. 358–359, 105378. DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105378
9. Niu L., Hong T., Xu X.-W., Wang X.-H., Li H., Ke Q., Ma Y.-C. Geochronology and trace elements of zircon in the Southern Chinese Altay: Implications for tectonic setting. *Geol. J.*, 2021, vol. 56, no. 7, pp. 3605–3625. DOI: 10.1002/gj.4120
10. Grimes C.B., Wooden J.L., Cheadle M.J., John B.E. "Fingerprinting" tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2015, vol. 170, no. 46. DOI: 10.1007/s00410-015-1199-3
11. Ewing T.A., Hermann J., Rubatto D. The robustness of the Zr-in-rutile and Ti-in-zircon thermometers during high-temperature metamorphism (Ivrea-Verbano Zone, northern Italy). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2013, vol. 165, no. 4, pp. 757–779. DOI: 10.1007/s00410-012-0834-5
12. Watson E.B., Wark D.A., Thomas J.B. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2006, vol. 151, no. 4, pp. 413–433. DOI: 10.1007/s00410-006-0068-5
13. Ferry J.M., Watson E.B.. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2007, vol. 154, no. 4, pp. 429–437. DOI: 10.1007/s00410-007-0201-0
14. Wang Q., Zhu D.C., Zhao Z.D., Guan Q., Zhang X.Q., Sui Q.L., Mo X.X. Magmatic zircons from I-, S- and A-type granitoids in Tibet: Trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, vol. 53, pp. 59–66. DOI: 10.1016/j.jseas.2011.07.027
15. Golivkin N.I. Petrografiya i petrokimiya porod stoilnikolaevskogo gabbro-dioritovogo kompleksa [Petrography and petrochemistry of the Stoilo-Nikolaevsky gabbro-diorite complex]. *Materialy po geologii i poleznym iskopaemym tsentral'nykh raionov evropeiskoi chasti SSSR – Materials on the geology and mineral resources of the Central regions of the European part of the USSR*, Moscow, 1962, vol. V, pp. 25–33 (In Russ.)
16. 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 vysshih učebnykh zavedenij. Geologija i razvedka – Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 1978, no. 8, pp. 33–45. (In Russ.)
17. Chernyshov N.M., Bocharov V.L., Molotkov S.P. Magmaticheskie formatsii i rudonosnost' rannego dokembriya VKM [Igneous formation and ore content of Early Precambrian of the Voronezh Massif]. *«Petrologiya i metallogeniya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov KMA i smezhnykh raionov» – "Petrology and metallogeny of the igneous and metamorphic complexes of KMA"*, Voronezh, VSU, 1983, pp. 3–49. (In Russ.)
18. Kholin V.M. *Geologiya, geodinamika i metallogenicheskaya otsenka ranneproterozoiskikh struktur KMA* Diss. kand. geol.-min. nauk [Geology, geodynamics and metallogenic estimation of the Paleoproterozoic KMA Structures. PhD in geology and mineralogy sci. diss.], Voronezh, 2001, 24 p. (In Russ.)
19. Artemenko G.V. Geokhronologicheskaya korrelyatsiya vulkanizma i granitoidnogo magmatizma yugo-vostochnoi chasti Ukrainkogo shchita i Kurskoi magnitnoi anomalii [Geochronological correlation of the volcanism and granitoid magmatism of south-eastern part of the Ukrainian Shield and Kursk Magnetic Anomaly. *Geokhimiya i rudoobrazovanie – Geochemistry and ore formation*, 1995, vol. 21, pp. 129–154 (In Russ.)
20. Korish E.Kh., Savko K.A., Samsonov A.V., Chervyakovskaya M.V. Paleoproterozoic diorites of the Trosnyansky Massif within the Kursk Block of Sarmatia: U–Pb age, isotope systematics and sources of melts. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2020, no. 1, pp. 87–99. DOI: 10.17308/geology.2020.1/2517 (In Russ.)
21. Savko K.A., Samsonov A.V., Bazikov N.S., Kozlova E.N. Paleoproterozoiskie granitoidy Tim-Yastrebovskoi struktury Voronezhskogo kristallicheskogo massiva: geokhimiya, geokhronologiya i istochniki rasplavov [Palaeoproterozoic granitoids of the Tim-Yastrebovskaya structure, Voronezh Crystalline Massif: Geochemistry, geochronology, and melt sources]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2014, no. 2, pp. 56–78. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2014/02/2014-02-09.pdf> (accessed: 18.01.2023). (In Russ.)
22. Savko K.A., Korish E.Kh., Bazikov N.S., Tsybulyaev S.V., Chervyakovskiy V.S., Kholina N.V., Hussain I. Paleoproterozoic I-type granodiorites of the Lunevsky massif, Kursk Block, Sarmatia: U–Pb age, isotopic systematics and sources of melt. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Geologija = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 4, pp. 4–23. DOI: 10.17308/geology.2021.4/3787 (In Russ.)
23. 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 Res.*, 2018, vol. 311, pp. 1–23. DOI: 10.1016/j.precamres.2018.04.009
24. Korish E.Kh., Savko K.A., Sal'nikova E.B., Samsonov A.V., Ivanova A.A., Larionov A.N., Tsybulyaev S.V. Paleoproterozoiskii diorit-granodioritovyi magmatizm Kurskogo bloka Sarmatii: rasshifrovka sblizhennykh vo vremeni geologicheskikh sobytii [Paleoproterozoic diorite-granodiorite magmatism of the Kursk block of Sarmatia: decoding of geological events close in time]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN – Proceedings of the Karelian Scientific Center of RAS*, 2022, no. 5, pp. 60–63. DOI: 10.17076/geo1655 (In Russ.)
25. 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 geo-

- chronological constraints. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2015, vol. 23, no. 5, pp. 451–467. DOI: 10.1134/S0869593815050068
26. 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. *Precam. Res.*, 2016, vol. 287, pp. 48–72. DOI: 10.1016/j.precamres.2016.10.015
27. 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
28. 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. *Precam. Res.*, 2020, vol. 346, 105790. DOI: 10.1016/j.precamres.2020.105790
29. 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
30. 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.
31. 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
32. Giovanardi T., Lugli, F. The Hf-INATOR: a free data reduction spreadsheet for Lu/Hf isotope analysis. *Earth Sci. Informat.*, 2017, pp. 1–7. DOI: 10.1007/s12145-017-0303-9
33. Terent'ev R.A., Savko K.A. Geokhimiya tsirkonov iz metaplagioriolitov i trond'emitov Losevskoi strukturno-formatsionnoi zony Voronezhskogo kristallicheskogo massiva [The geochemistry of zircons from metalplagiorthyolite and trondhjemite of Losevo structural and formational zone, Voronezh Crystalline Massif]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya –Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2015, no. 2, pp. 53–62. URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2015/02/2015-02-08.pdf> (accessed: 18.01.2023) (In Russ.)
34. Rubatto D. Zircon: The metamorphic mineral. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2017, vol. 83, no. 1, pp. 261–295. DOI: 10.2138/rmg.2017.83.9
35. Grimes C.B., John B.E., Kelemen P.B., Mazdab F.K., Wooden J.L., Cheadle M.J., Hanghøj K., Schwartz J.J. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: a method for distinguishing detrital zircon provenance. *Geology*, 2007, vol. 35, pp. 643–646. DOI: 10.1130/G23603A.1

Савко Константин Аркадьевич, д.г.-м.н., профессор, ведущий 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>

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

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

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

Червяковская Мария Владимировна, младший научный сотрудник Института геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, Екатеринбург, РФ; e-mail: masha\_vuf\_91@mail.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7074-5433>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Korish Ekaterina Kh., 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>

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

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

Chervyakovskaya Maria V., 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>

Authors have read and approved the final manuscript.