

ГЕОХРОНОЛОГИЯ ТТГ АССОЦИАЦИИ В МЕЗОАРХЕЕ
КУРСКОГО БЛОКА ВОСТОЧНОЙ САРМАТИИ

К. А. Савко¹, А. В. Самсонов², Е. Б. Сальникова³,
А. Н. Ларионов⁴, М. В. Червяковская⁵, Н. С. Базиков¹, Е. Х. Кориш¹

¹Воронежский государственный университет

²Институт геологии рудных месторождений,

петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва

³Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, г. Санкт-Петербург

⁴Центр изотопных исследований Всероссийского геологического
института им. Д. П. Карпинского, г. Санкт-Петербург

⁵Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург

Поступила в редакцию 25 января 2019 г.

Аннотация: изотопное датирование цирконов методами SIMS и TIMS позволило установить три импульса ТТГ магматизма в Курском блоке Восточной Сарматии: 2960, 3025 и 3050 млн лет назад. Следовательно, формирование ТТГ Курского блока было длительным процессом, продолжавшимся не менее 90 млн лет. Они имеют такие же петрохимические характеристики с близкими по возрасту ассоциациями Среднеприднепровского (2,97–3,03 млрд лет) и Приазовского (2,97–3,04 млрд лет) блоков. Lu-Hf изотопные данные по цирконам ($\epsilon_{\text{Hf}}(2960) = +0,2 - +2,6$) свидетельствуют о кратковременной коровой предыстории источников ТТГ расплавов.

Ключевые слова: ТТГ, магматизм, архей, Курский блок, Среднеприднепровский блок, Приазовский блок.

GEOCHRONOLOGY OF TTG ASSOCIATION IN MESOARCHAEOAN
WITHIN THE KURSK BLOCK, EASTERN SARMATIA

Abstract: the zircons isotope dating using the SIMS and TIMS methods allowed establishing three pulses of TTG magmatism in the Kursk domain of Eastern Sarmatia: 2960, 3025 and 3050 Ma. Consequently, the TTG formation of the Kursk domain was a long-term process that continued at least 90 million years. They have the same chemical characteristics as the associations of Middle Dnieper (2,97–3,03 Ga) and Azov (2,97–3,04 Ga) domains that are similar in age. The zircons Lu-Hf isotopic data ($\epsilon_{\text{Hf}}(2960) = +0,2 - +2,6$) indicate a short-term crustal prehistory of the TTG melts sources.

Keywords: TTG, magmatism, Archaean, Kursk domain, Middle Dnieper domain, Azov domain.

Введение

Архейские ядра раннедокембрийских кратонов сложены породами ТТГ ассоциации – гнейсами, гранитоидами и мигматитами тоналит-трондьемит-гранодиоритового состава. Обычно они образуются в нижней коре при выплавлении из метабазитов и отражают специфику архейской геодинамики, для которой уже более 40 лет обсуждаются различные тектонические модели [1]. Не является исключением и Курский блок Восточной Сарматии, для которого совсем недавно были получены первые прецизионные оценки возраста гранитоидов мезоархейской ТТГ ассоциации методом SIMS по цирконам из двух проб –

2,96 млрд лет [2]. Такие оценки возраста оказались существенно моложе разновозрастных (3,19, 3,13, 3,07 млрд лет) ТТГ Среднеприднепровского блока Украинского щита [3, 4], который вместе с Приазовским и Курским блоками составляют мезоархейское ядро Сарматии – южного сегмента (в современных координатах) Восточно-Европейского кратона [5] (рис. 1). Для разрешения этой проблемы предпринято дополнительное изотопное датирование цирконов из других скважин и участков методами SIMS и TIMS. Цель настоящей статьи – выявление продолжительности ТТГ магматизма в мезоархее Курского блока с целью возрастной корреляции его дискретных

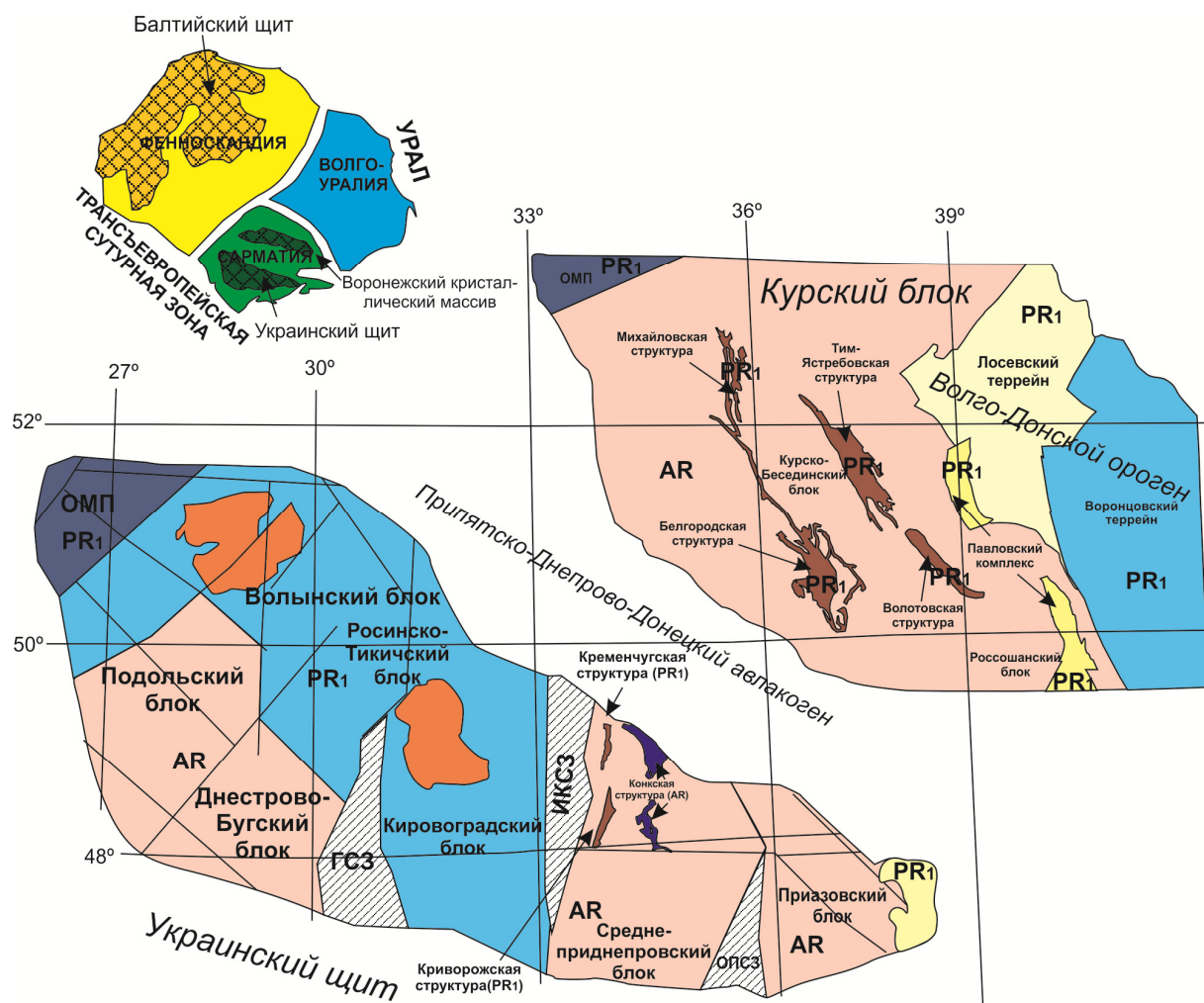


Рис. 1. Схематическая структурная карта Сарматии, составленная по [6] для Украинского щита и по собственным материалам для Воронежского кристаллического массива. Схема сегментов Восточно-Европейского кратона по [7]. Аббревиатуры: ГСЗ – Голованевская сутурная зона, ИКСЗ – Ингулец-Павлоградская сутурная зона, ОПСЗ – Орехово-Павлоградская сутурная зона, ОМП – Осницко-Микашевичский пояс.

импульсов с ТТГ ассоциациями.

Украинского щита. Другим важным аспектом определения продолжительности ТТГ магматизма является то, что ТТГ, судя по изотопно-химическим данным, могли служить источником расплавов внутриплитных неоархейских и постколлизийных палеопротерозойских кислых и средних магматических пород Курского блока [8, 9, 10]. Для этих целей было проведено изотопно-геохимическое изучение цирконов из ТТГ.

Геология ТТГ Курского блока

Курский блок представляет собой типичную архейскую гранит-зеленокаменную область, состоящую из сохранившихся осадочно-вулканогенных фрагментов и преобладающих по площади гранито-гнейсовых ареалов (рис. 2). В гранито-гнейсовых ареалах доминируют полосчатые гнейсы и мигматиты обоянского комплекса, варьирующие по составу от трондjemитов до тоналитов, с маломощными прослоями амфиболитов. U-Pb изотопный возраст цир-

кона из мигматизированного плагиогнейса обоянского комплекса в пределах Курско-Бесединского домена составляет 3277 ± 33 млн лет [11]. Это согласуется с Sm-Nd модельными возрастными гнейсов обоянского комплекса в интервале 3,64–3,03 млрд лет и предполагает мезо- или палеоархейский возраст их протолитов [12]. Зеленокаменные области включают основные, ультраосновные и кислые метавулканиды, терригенные метаосадки, метаморфизованные породы железисто-кремнистой формации [13, 14]. Возраст метариолитов из вулканогенно-осадочного разреза Тарасовского участка, определенный по цирконам (SIMS), составляет 3122 ± 9 млн лет [15]. В обрамлении зеленокаменных областей, а также среди гнейсов и мигматитов обоянского комплекса, располагаются массивы ТТГ гранитоидов, которые объединяются в салтыковский комплекс. Ранее опубликованная единственная датировка 3013 ± 80 млн лет [16] не позволяет проводить уверенные возрастные корреляции ТТГ магматизма Курского блока и Украинского щита.

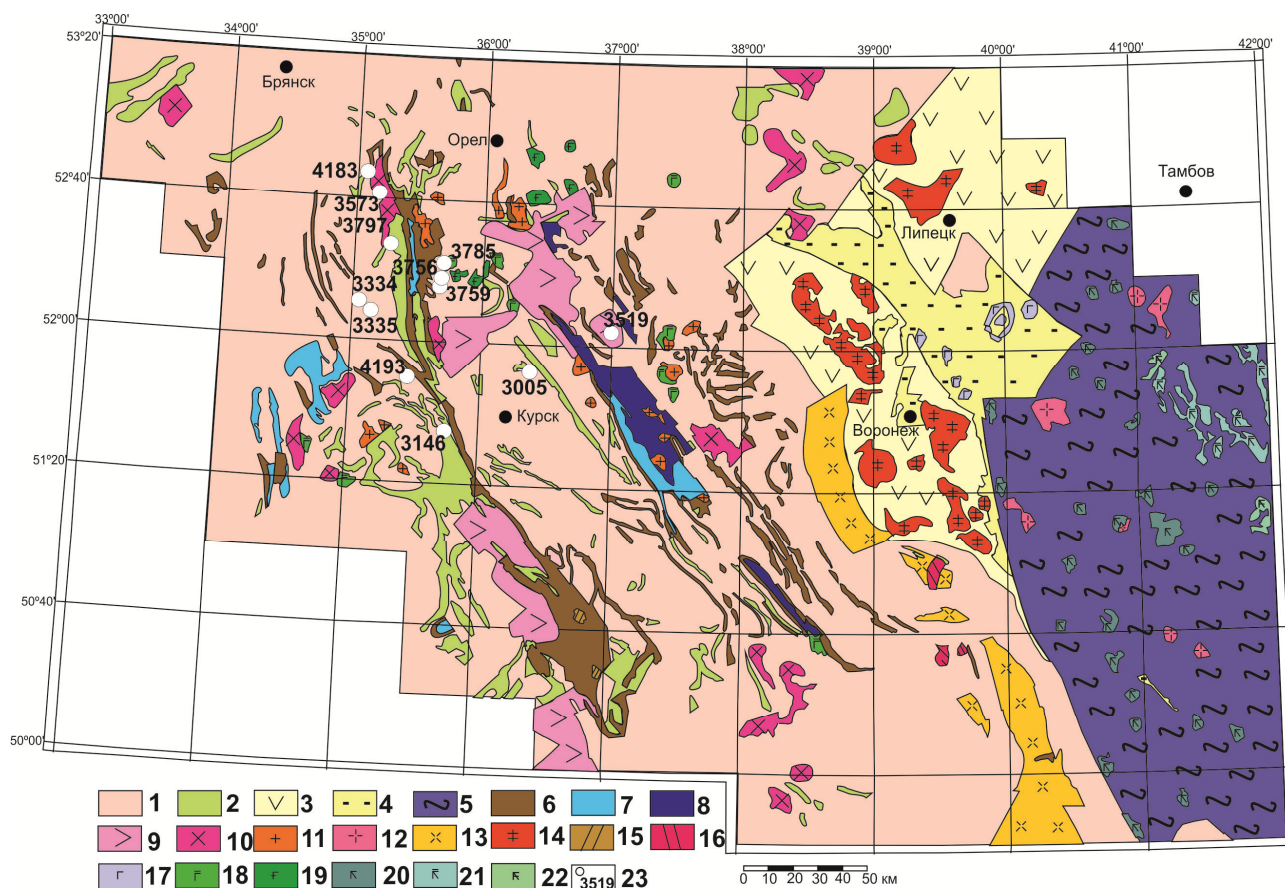


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Воронежского кристаллического массива: 1 – обоянский комплекс; 2 – михайловская серия; 3 – лосевская серия; 4 – воронежская свита; 5 – воронцовская серия; 6 – курская серия; 7 – роговская свита; 8 – тимская свита; 9 – салтыковский комплекс; 10 – атаманский комплекс; 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 – скважины, вскрывшие породы ТТГ-ассоциации, и их номера.

Методы исследования

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 и 2 г в муфельной печи с последующим отливом стеклообразного диска. При калибровке спектрометра и для контроля качества измерений были использованы государственные стандартные образцы химического состава горных пород – ГСО № 8871-2007, ГСО № 3333-85, ГСО № 3191-85. Точность анализа составляла 1–5% отн. % для элементов с концентрациями выше 1–5 мас. % и до 12 отн. % для элементов с концентрацией ниже 0,5 мас. %. Обработка результатов проводилась посредством разработанных методик в программе Spectra Plus (Bruker AXS GmbH, Германия).

Выделение циркона проводилось по стандартной методике с использованием тяжелых жидкостей. Локальные U-Pb анализы цирконов выполнены в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург) на ионном микрозонде SHRIMP II по стандартной

методике [17] с использованием эталонных цирконов "91500" и "Temora".

При U-Pb геохронологических исследований методом TIMS кристаллы циркона подвергались многоступенчатому удалению поверхностных загрязнений. Химическое разложение циркона и выделение U и Pb выполнялось по модифицированной методике Т. Е. Кроу [18]. Для уменьшения степени дискордантности использовался метод предварительной кислотной обработки [19]. Изотопные анализы выполнены на многоколлекторном масс-спектрометре TRITON TI как в статическом режиме, так и динамическом режиме (при помощи счетчика ионов). Для изотопных исследований использовался трассер ^{235}U – ^{202}Pb . Точность определения U/Pb отношений и содержаний U и Pb составила 0,5%. Холостое загрязнение не превышало 15 пг Pb и 1 пг U.

Обработка изотопных данных проводилась при помощи программ "PbDAT" [20] и "ISOPLOT" [21]. При расчете возрастов использованы общепринятые значения констант распада урана [22]. Поправки на обычный свинец введены в соответствии с модельными величинами [23]. Все ошибки приведены на

уровне 2-σ.

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. Использованное 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}Yb и ^{176}Lu на ^{176}Hf , оптимизация процедуры обработки экспериментальных данных с использованием образцов сравнения циркона Mud Tank, GJ-1 [24, 25]. Неопределенность единичного измерения отношения $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ в виде 2SD – в интервале 0,005–0,008 %. Неопределенность единичного определения значения εHf в виде 2SD варьировала для перечисленных стандартов в интервале 5–9%. Полученные значения изотопных отношений Hf/Hf для стандартов Mud Tank и GJ-1 согласуются с базой данных GeoREM. Операционные параметры приставки для лазерной абляции: плотность энергии лазерного излучения – 14 Дж/см², частота повторения импульсов – 20 Гц, диаметр кратера – 25 мкм. Для обработки Lu-Hf данных был использован макрос Hf-INATOR для Excel [26].

Петрография и петрохимия

ТТГ представлены светло-серыми массивными и полосчатыми среднезернистыми породами, иногда порфиоровидными. Минеральный состав (об. %): плагиоклаз ($X_{\text{Ca}} = 0,15–0,25$) – 45–55%, кварц – 20–25%, биотит ($X_{\text{Mg}} = 0,55–0,65$) – 10–20%, микроклин – до 5–10%. Редко присутствует зеленая роговая обманка (до 5%), часто замещаемая эпидотом и хлоритом. Акцессорные минералы представлены апатитом, цирконом, монацитом и сульфидами, вторичные – хлоритом, эпидотом, мусковитом.

Концентрации SiO_2 и Al_2O_3 в ТТГ находятся в пределах 62–72 мас. % и 13,9–16,4 мас. % соответственно (табл. 1). Они являются мета- и перглиноземистыми ($A/\text{CNK} = 0,88–1,10$). Содержания Fe-Mg оксидов довольно высокие ($\text{FeO}_t + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{TiO}_2 = 4,2–10,1$ мас. %), как и MgO (1,0–3,8 мас. %, $X_{\text{Mg}} = 0,30–0,57$). На диаграммах Харкера явно выражена отрицательная корреляция $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{tot}}$, MgO, P_2O_5 , TiO_2 по отношению к SiO_2 (рис. 3). Все образцы обогащены натрием ($\text{Na}_2\text{O} = 3,6–5,5$ мас. %) с отношением $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1,3–3,9$.

По содержаниям петрогенных оксидов ТТГ Курского блока близки к гнейсовидным гранитоидам и мигматитам ТТГ состава днепрпетровского комплекса Среднеприднепровского блока (рис. 3) [27, 28, 29].

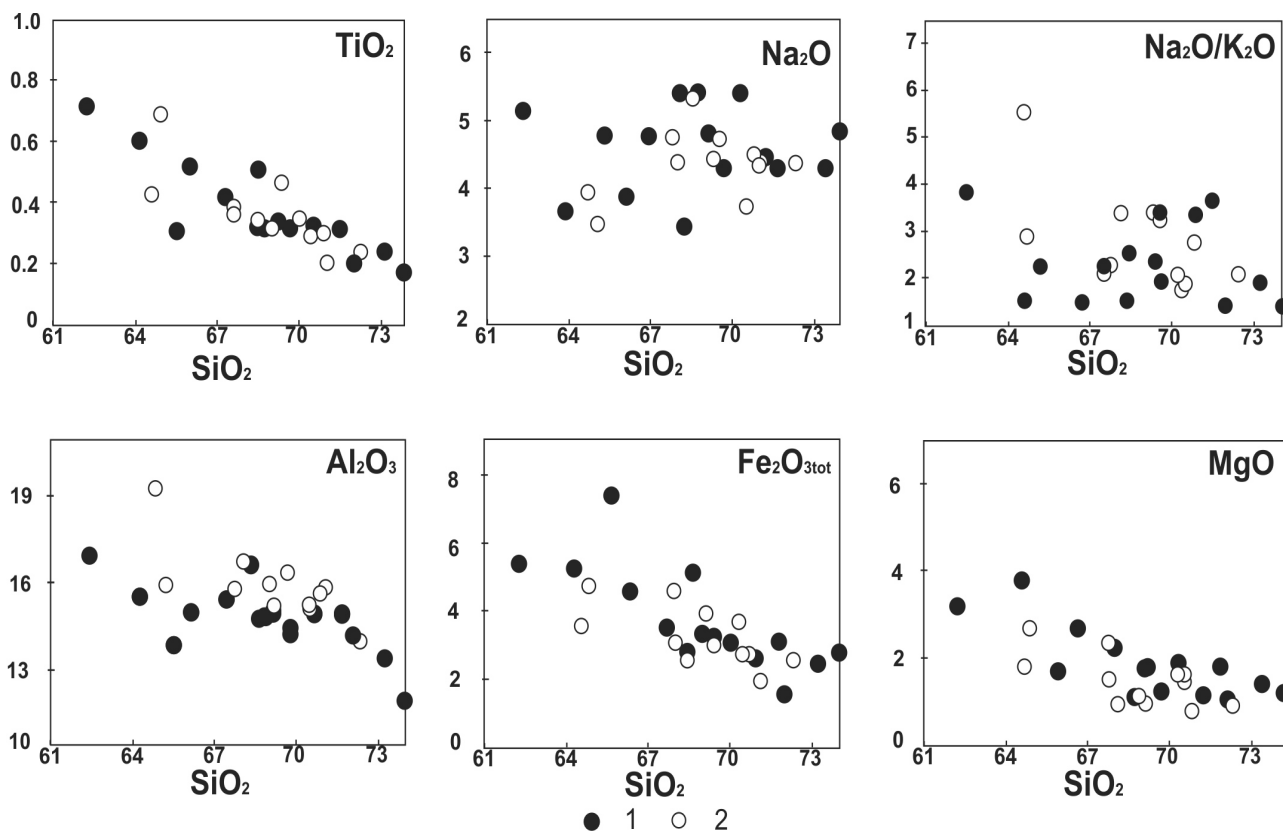


Рис. 3. Составы пород ТТГ ассоциации Курского блока на диаграммах Харкера: 1 – ТТГ Курского блока; 2 – ТТГ Средне-Приднепровского блока, относимые к днепрпетровскому комплексу по [25, 26, 27].

Таблица 1

Содержания петрогенных оксидов в ТТГ Курского блока

Скважина/ глубина	3759/ 465	3146/ 304	3759/ 461,7	3756/ 524,8	3785/ 323,8	3785/ 340	3797/ 564,5	3005/ 322	4183/ 735,5	4193/ 312,6	3334/ 346,7	3335/ 422,5	3573/ 625	3573/ 683,3	3573/ 731,5	3573/ 740,6
SiO ₂	69,79	62,07	67,20	65,97	66,95	64,19	69,41	71,44	68,71	68,64	70,87	69,27	71,82	73,15	73,15	74,06
TiO ₂	0,33	0,73	0,42	0,31	0,51	0,64	0,34	0,34	0,51	0,33	0,33	0,39	0,20	0,24	0,24	0,18
Al ₂ O ₃	14,65	16,14	15,33	13,88	14,54	15,12	14,88	14,44	14,64	16,26	14,65	14,73	14,02	13,24	13,24	11,84
Fe ₂ O ₃ tot	3,05	5,40	3,55	7,50	4,41	5,67	3,16	3,27	4,92	2,71	2,65	3,20	1,73	2,57	2,57	2,68
MgO	1,93	3,34	2,14	1,64	2,83	3,78	1,30	1,02	1,80	1,09	1,37	1,84	1,98	1,68	1,68	1,54
MnO	0,04	0,07	0,04	0,06	0,07	0,04	0,03	0,03	0,05	0,06	0,04	0,06	0,01	0,02	0,02	0,01
CaO	2,41	4,20	3,17	2,87	3,31	3,05	3,21	2,84	3,17	2,41	2,68	2,24	1,07	0,56	0,56	0,37
Na ₂ O	4,16	5,11	4,76	4,70	3,70	3,60	4,71	4,25	3,17	5,38	5,22	5,45	4,25	4,33	4,33	4,70
K ₂ O	2,22	1,33	2,23	2,11	2,80	2,64	2,08	1,21	2,48	2,22	1,51	1,76	3,41	2,43	2,43	3,73
P ₂ O ₅	0,10	0,46	0,21	0,12	0,26	0,18	0,15	0,06	0,25	0,10	0,13	0,14	0,07	0,12	0,12	0,07
ППП	1,05	0,88	0,72	0,24	0,39	0,79	0,46	0,67	—	1,05	0,39	0,78	1,28	1,33	1,33	0,70
Сумма	99,73	99,93	99,77	99,66	99,76	99,70	99,73	99,57	99,70	100,25	99,84	99,87	99,88	99,66	99,66	99,89
X _{Mg}	0,56	0,55	0,54	0,30	0,56	0,57	0,45	0,38	0,42	0,44	0,51	0,53	0,53	0,56	0,56	0,53
Na ₂ O/K ₂ O	1,87	3,84	2,13	2,23	1,32	1,36	2,26	3,51	1,28	2,42	3,46	3,10	1,25	1,78	1,78	1,26
Fe ₂ O ₃ +MgO+MnO+TiO ₂	5,35	9,54	6,15	9,51	7,82	10,13	4,83	4,66	7,28	4,19	4,39	5,49	3,92	4,51	4,51	4,41
A/CNK	1,07	0,92	0,96	0,91	0,96	1,05	0,94	1,07	1,07	1,04	0,97	0,98	1,11	1,23	1,23	0,95

U-Pb геохронология по цирконам

Совсем недавно нами были опубликованы локальные U-Pb анализы цирконов из трондьемита (скважина 3759, глубина 461,7 м) и тоналита (скважина 3146, глубина 304 м) [2]. Еще одна проба для датирования была отобрана из представительного разреза скважины 3573 глубины 625 м в краевой части Михайловской палеопротерозойской структуры (рис. 2), где на ТТГ залегают неоархейские метабазиты, которые перекрываются метаконгломератами и метапесчаниками игнатеевской свиты (рис. 4).

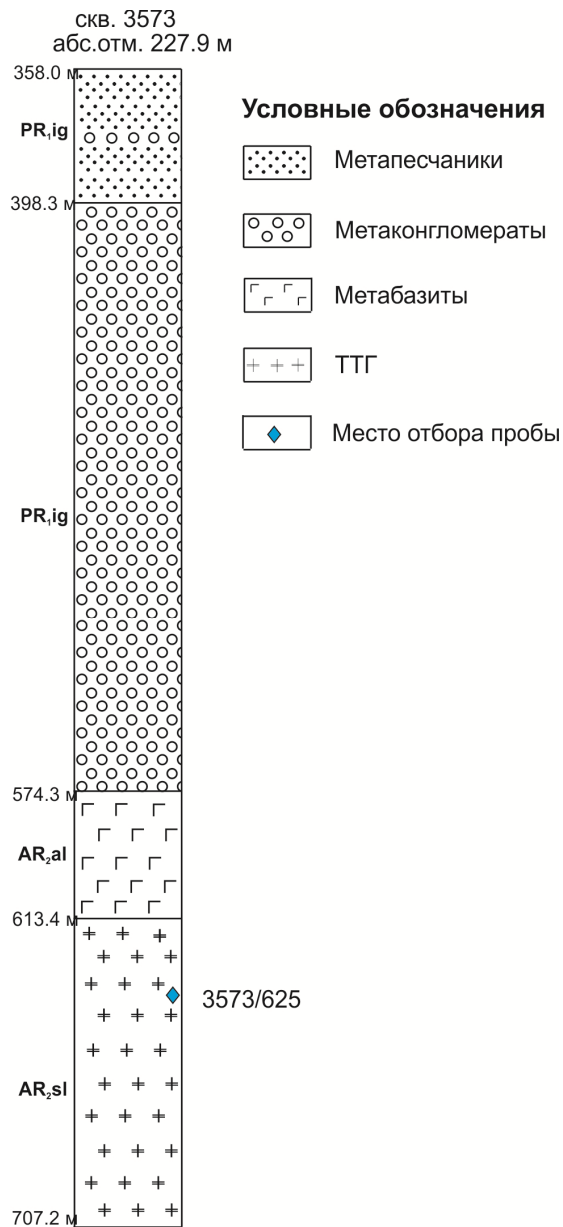


Рис. 4. Геологическая колонка скважины 3573.

Цирконы в пробе 3573/625 – идиоморфные и субидиоморфные зёрна размером 100–250 мкм и шириной 50–150 мкм (рис. 5). В зернах наблюдаются концентрические и радиальные трещины, скорее всего, возникшие в результате метамиктных изменений.

В катодоллюминесценции видна структура роста – тонкая концентрическая осцилляторная зональность. Незональные участки (возможный результат рекристаллизации) наблюдаются на вершинах пирамид довольно редко. Часто границы зон роста криволинейные, что может указывать на эпизоды частичного растворения в процессе роста, но унаследованных ядер не выявлено. Структурные и морфологические признаки указывают на магматическую природу циркона и практическое отсутствие значительных наложенных событий.

В пробе 3573/625 было выполнено 16 анализов в 15 зернах (табл. 2), анализировались и центральные и

краевые (незональные) части (рис. 5). Все результаты на графике с конкордией аппроксимируются единой линией регрессии (рис. 6). Невысокое отклонение точек от линии регрессии (СКВО = 2,7) предполагает незначительное воздействие докембрийских процессов на цирконы. Незональные внешние участки перекристаллизации могли образоваться на заключительных стадиях магматической кристаллизации цирконов. Возраст по верхнему пересечению с конкордией (16 анализов) составляет 3051 ± 5 млн лет. Значения, полученные по нижним пересечениям дискордии, учитывая сложную историю пород, скорее всего, не имеют геологического смысла.

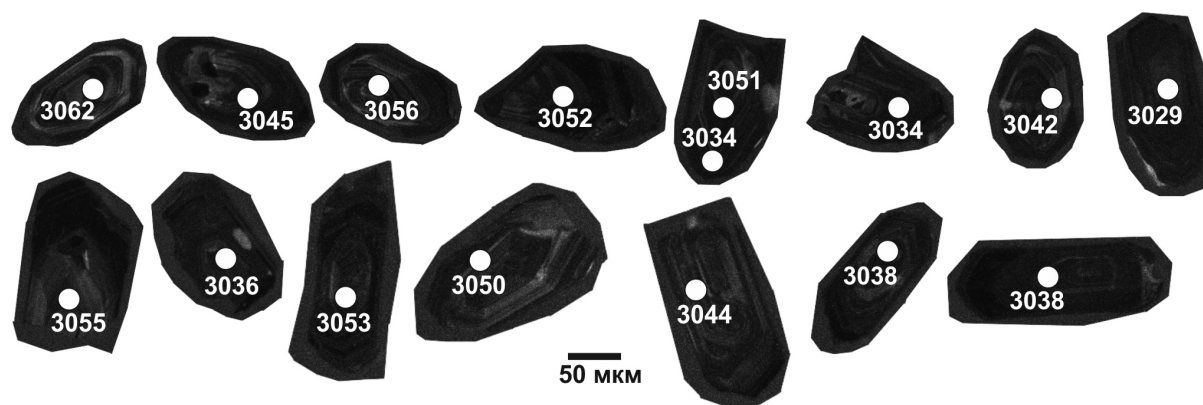


Рис. 5. Катодоллюминесцентные снимки цирконов из ТТГ Курского блока и точки определения возраста их кристаллизации методом SIMS.

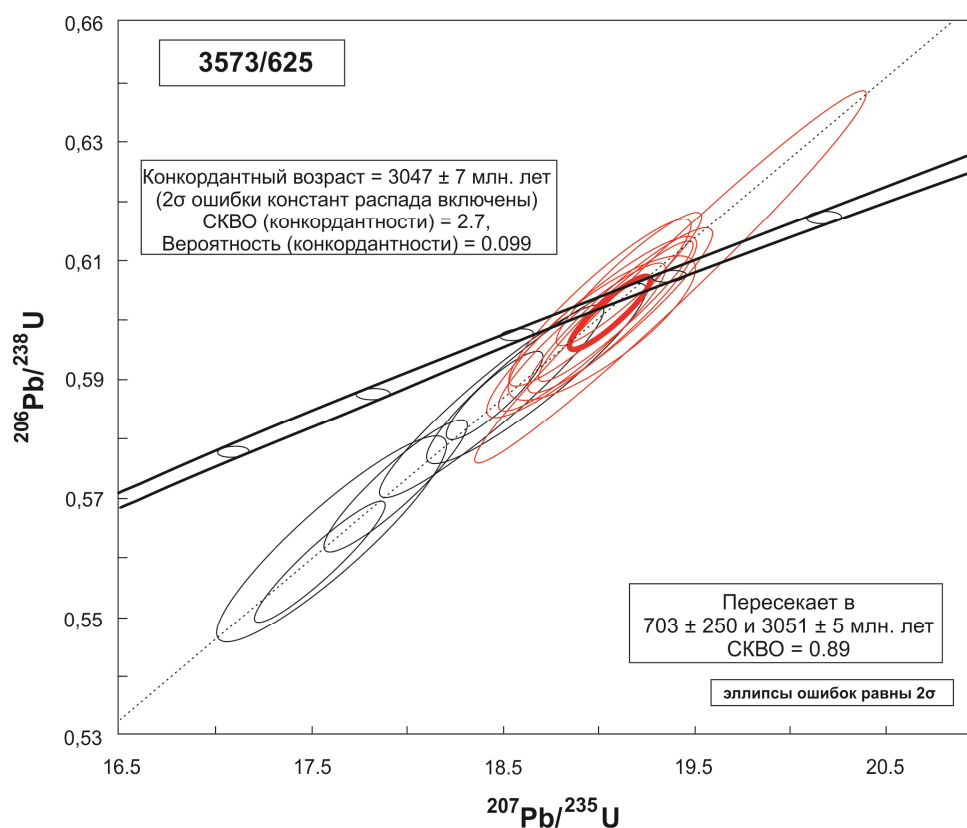


Рис. 6. Результаты U-Pb датирования цирконов из ТТГ Курского блока методом SIMS.

Таблица 2

Результаты U-Pb исследований цирконов из трондьемита (обр. 3573/625)

Точка	% $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	мкг/г U	мкг/г Th	мкг/г $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст	% дис-кордантности	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (1)	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (1)	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (1)	$\pm\%$	Корр. ошиб.
						возраст	возраст													
2,1	-	376	262	196	0,72	3058	± 18	3045	± 5	1,6	0,75	0,2290	0,28	19,161	0,8	0,6070	0,75	0,9	0,9	0,9
13,1	-	184	122	95,4	0,69	3042	± 23	3044	± 6	1,7	0,93	0,2288	0,39	19,022	1,0	0,6030	0,93	0,9	0,9	0,9
1,1	-	144	91	75,1	0,65	3059	± 51	3062	± 7	1,6	2,11	0,2314	0,41	19,374	2,1	0,6071	2,11	1,0	1,0	1,0
11,1	-	291	287	151	1,02	3036	± 20	3053	± 5	1,7	0,81	0,2301	0,32	19,091	0,9	0,6016	0,81	0,9	0,9	0,9
9,1	0,02	183	105	94,8	0,59	3037	± 23	3055	± 6	1,7	0,94	0,2304	0,40	19,111	1,0	0,6017	0,94	0,9	0,9	0,9
12,1	0,07	130	68	66,7	0,54	3025	± 25	3050	± 8	1,7	1,05	0,2298	0,50	18,971	1,2	0,5988	1,05	0,9	0,9	0,9
3,1	0,05	265	175	136	0,68	3023	± 20	3056	± 10	1,7	0,84	0,2306	0,61	19,020	1,0	0,5983	0,84	0,8	0,8	0,8
5,1	0,04	219	120	112	0,57	3017	± 21	3051	± 6	1,7	0,87	0,2298	0,37	18,910	0,9	0,5968	0,87	0,9	0,9	0,9
4,1	-	314	219	161	0,72	3007	± 19	3052	± 5	1,7	0,80	0,2300	0,32	18,845	0,9	0,5942	0,80	0,9	0,9	0,9
15,1	0,01	465	342	236	0,76	2990	± 17	3038	± 4	1,7	0,71	0,2280	0,26	18,549	0,8	0,5901	0,71	0,9	0,9	0,9
14,1	-	415	327	210	0,81	2989	± 17	3038	± 4	1,7	0,72	0,2280	0,27	18,544	0,8	0,5899	0,72	0,9	0,9	0,9
7,1	-	179	99	90,5	0,57	2987	± 23	3042	± 7	1,7	0,94	0,2286	0,43	18,574	1,0	0,5893	0,94	0,9	0,9	0,9
10,1	0,02	231	114	116	0,51	2957	± 21	3036	± 6	1,7	0,87	0,2278	0,39	18,280	1,0	0,5821	0,87	0,9	0,9	0,9
5,2	0,02	309	163	152	0,54	2916	± 19	3034	± 5	1,7	0,79	0,2275	0,32	17,940	0,9	0,5720	0,79	0,9	0,9	0,9
8,1	-	124	44	60,1	0,36	2880	± 29	3029	± 9	1,8	1,27	0,2267	0,54	17,605	1,4	0,5632	1,27	0,9	0,9	0,9
6,1	-	418	296	201	0,73	2864	± 17	3034	± 5	1,8	0,74	0,2274	0,28	17,542	0,8	0,5594	0,74	0,9	0,9	0,9

Примечания: Ошибки равны 1 сигма. Pb, и Pb* – первичный и радиогенный свинец, соответственно. Ошибки стандартной калибровки 0,21%. (1) Первичный свинец скорректирован по измеренному ^{204}Pb .

Таблица 3

Результаты U-Pb изотопных исследований циркона (проба 3335/422,33)

Номер п/п	Размерная фракция (мкм) и характеристика циркона	U/Pb*	Изотопные отношения				Rho	Возраст, млн лет	
			$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
1	< 100, кисл,обр = 2,0	1,76	829	0,2148 \pm 1	0,0963 \pm 1	14,8740 \pm 321	0,5021 \pm 6	2623 \pm 6	2942 \pm 1
2	< 100, кисл,обр = 2,5	1,63	2035	0,2187 \pm 1	0,0716 \pm 1	16,1245 \pm 322	0,5348 \pm 6	2884 \pm 5	2971 \pm 1
3	> 100, кисл,обр = 2,0	1,58	825	0,2200 \pm 1	0,0793 \pm 1	16,4573 \pm 410	0,5425 \pm 7	2904 \pm 7	2981 \pm 1
4	< 100, кисл,обр = 3,0	1,76	2640	0,2219 \pm 1	0,0748 \pm 1	17,0603 \pm 235	0,5575 \pm 4	2928 \pm 4	2995 \pm 1

Примечания: а – изотопные отношения, скорректированные на бланк и обычный свинец; Rho – коэффициент корреляции ошибок отношений $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$; – навеска циркона не определялась; кисл.обр = 2,0 – кислотная обработка циркона с заданной экспозицией (часы). Величины ошибок (2 σ) соответствуют последним значащим цифрам.

Выбранные для TIMS U-Pb геохронологических исследований кристаллы циркона (или их фрагменты) из образца трондьемита 3335/422,5 (скважина 3335, глубина 422,5 м) представлены субидiomорфными полупрозрачными кристаллами светло-коричневого цвета, имеющими короткопризматический и призматический облик (рис. 7). Кристаллы огранены комбинацией призм {100}, {110} и дипирамид {101}, {111}, {112} (рис. 7 I-IV). Размер этого циркона варьирует от 50 до 100 мкм; $K_{удл} = 1.0-3.0$. Для внутреннего строения циркона характерна осцилляторная зональность (рис. 7 V-VIII) и секториальность (рис. 7 VIII).

Для U-Pb изотопных исследований нами были

использованы четыре навески циркона из размерных фракций > 100 и < 100 мкм, подвергнутого предварительной кислотной обработке в течение 2 или 3 часов. Результаты измерений приведены в табл. 3. Точки изотопного состава этого циркона (№ 1-4) располагаются на дискордии (рис. 8), верхнее пересечение которой с конкордией соответствует возрасту 3025 ± 6 млн лет, а нижнее – 996 ± 62 млн лет (СКВО = 1,1). Морфологические особенности изученного циркона указывают на его магматическое происхождение, полученную по верхнему пересечению дискордии оценку возраста 3025 ± 6 млн лет можно рассматривать в качестве оценки возраста его кристаллизации.

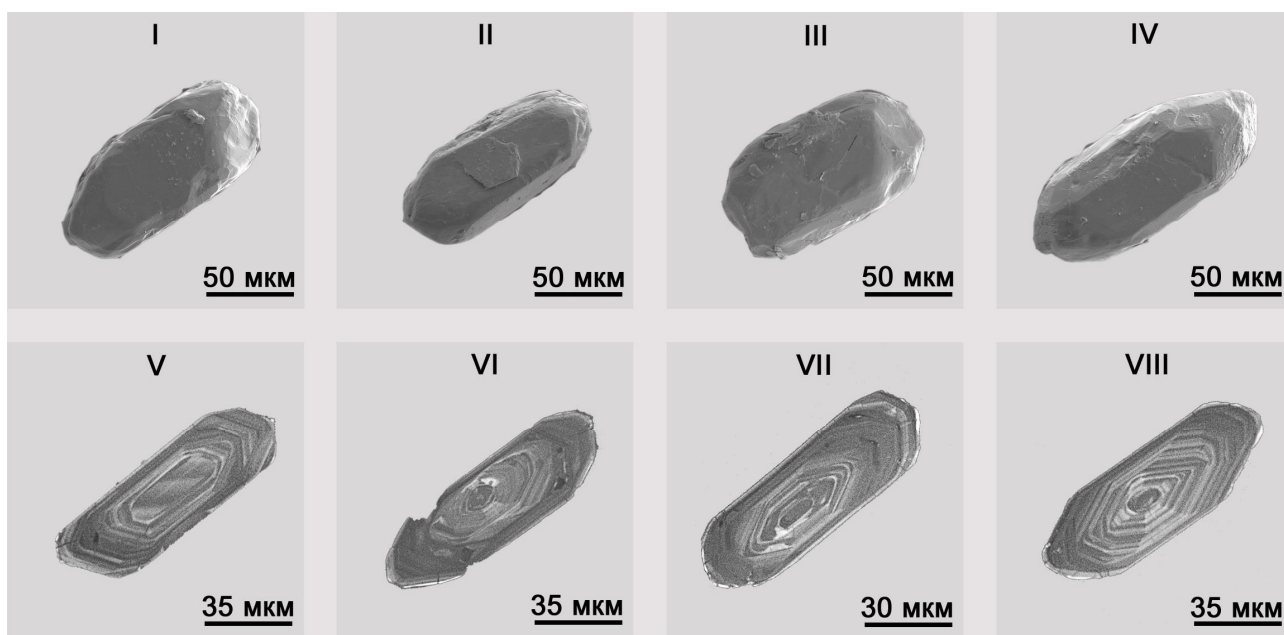


Рис. 7. Морфология кристаллов циркона из ТТГ Курского блока, отобранных для геохронологических исследований методом TIMS.

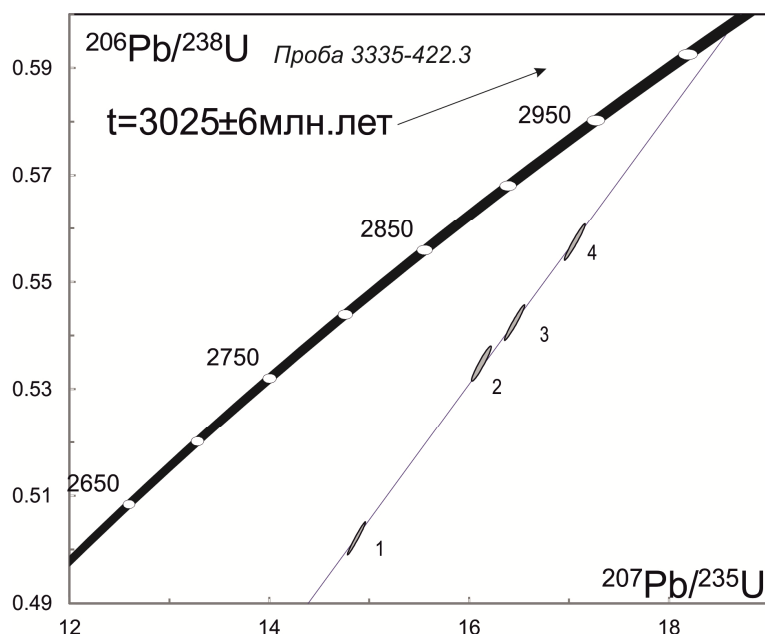


Рис. 8. Результаты U-Pb датирования цирконов из ТТГ Курского блока методом TIMS.

Изотопный состав Hf в цирконах из трондьемита (обр. 3759/461,7) определялся в тех же точках, где и U-Pb изотопный возраст [2]. Значения $\epsilon\text{Hf}(2960)$ в цирконах из ТТГ находятся в интервале от + 0,2 до + 2,6 (табл. 4, рис. 9). Модельный возраст $T_{\text{Hf}}(\text{DM})$, рас-

считанный по одностадийной модели при выплавлении магмы из деплетированной мантии составляет 3106–3188 млн лет, тогда как рассчитанный по двухстадийной модели $T_{\text{Hf}}(\text{DM})^c$ варьирует от 3199 до 3347 млн лет (табл. 4).

Таблица 4

Hf изотопные анализы циркона из ТТГ Курского блока (образец 3759/461,7)

№ точки	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{178}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	T_{DM}	T_{DM}^c
5,2	0,028329	0,000242	0,000867	0,000064	0,280999	0,000064	1,467095	0,000171	2,3	3119	3220
7,1	0,013523	0,000213	0,000447	0,000079	0,280933	0,000079	1,467278	0,000183	0,8	3173	3309
10,1	0,015184	0,000455	0,000510	0,000055	0,280987	0,000055	1,467256	0,000108	2,6	3106	3199
10,3	0,016612	0,000194	0,000584	0,000057	0,280961	0,000057	1,467201	0,000119	1,5	3148	3267
15,1	0,025621	0,000858	0,000804	0,000039	0,280938	0,000039	1,467157	0,000107	0,2	3197	3347
19,1	0,020932	0,001022	0,000708	0,000049	0,280976	0,000049	1,467202	0,000099	1,8	3138	3251

Примечание: первичное отношение изотопов гафния $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$; рассчитано с использованием константы распада ^{176}Lu $\lambda = 1,867 \cdot 10^{-11}$; $\epsilon\text{Hf}(t)$ рассчитан для возраста 2960 млн лет; T_{DM}^c модельный возраст источника, рассчитанный по двухстадийной модели с использованием $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0,015$, основанной на выплавлении магмы из средней континентальной коры, образованной из деплетированной мантии.

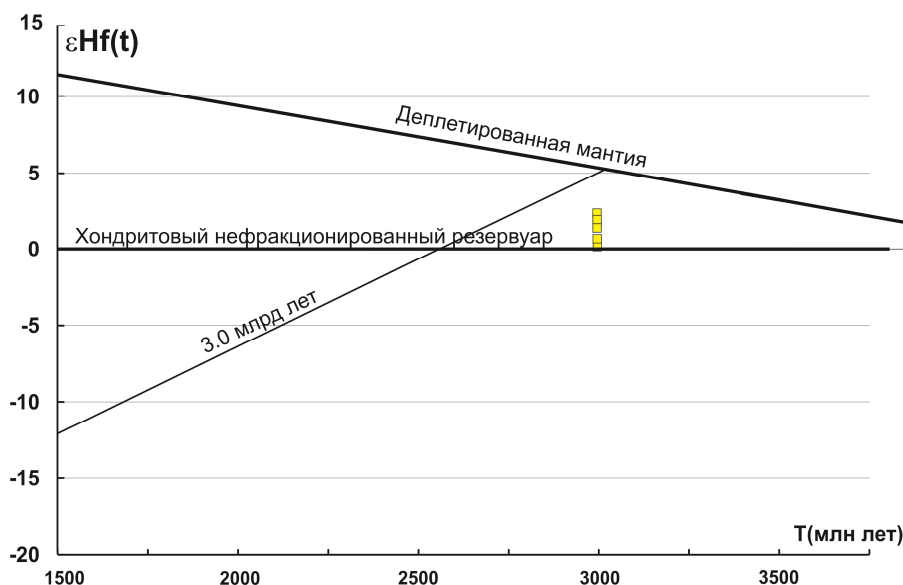


Рис. 9. Диаграмма $\epsilon\text{Hf}(t) - T$ для цирконов из ТТГ Курского блока.

Обсуждение результатов и выводы

Полученные значения возрастов кристаллизации ТТГ гранитоидов Курского блока 2960, 3025 и 3050 млн лет охватывают временной интервал в 90 млн лет. Это свидетельствует, что формирование ТТГ Курского блока было длительным процессом, продолжавшимся не менее 90 млн лет.

В Среднеприднепровском блоке ТТГ имеют возраст 3,20, 3,13, 3,08 млрд лет [4]. В Приазовском блоке установлены как палеоархейские ТТГ с возрастом 3,67, 3,5 [28] и 3,3 млрд лет [30], так и мезоархейские с возрастом 2,97–3,04 [31] и 2,89 млрд лет [32]. Метаморфизм гранулитовой и амфиболитовой фаций на

рубеже 2,82 млрд лет, установленный во всей Восточной Сарматии [28, 33, 34], фиксирует консолидацию мезоархейской коры, основным структурно-вещественным элементом которой были зеленокаменные области и комплексы ТТГ. Проявления ТТГ магматизма в неоархее и палеопротерозое отсутствуют в Восточной Сарматии, хотя в пределах других древних кратонов неоархейские и даже палеопротерозойские ТТГ не редкость.

Lu-Hf изотопные данные по цирконам свидетельствуют о сравнительно кратковременной коровой предыстории источников ТТГ расплавов, которыми могли служить основные породы гнейсовых и зелено-

каменных комплексов с возрастом 3,1–3,2 млрд лет [15] и более древние ТТГ, как, например, в Среднеприднепровской гранит-зеленокаменной области.

Таким образом, в Курском блоке пока достоверно установлен временной период ТТГ магматизма 2960–3051 млн лет назад с отдельными импульсами 2960, 3025 и 3051 млн лет назад, который имеет такие же петрохимические характеристики с близкими по возрасту ассоциациями Среднеприднепровского (2,97–3,03 млрд лет) и Приазовского (2,97–3,04 млрд лет) блоков.

Работа поддержана Госзаданием ИГЕМ РАН и проектами РФФИ № 17-05-00618 и 19-05-00159.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Moyen, J.-F.* Forty years of TTG research / J.-F. Moyen, H. Martin // *Lithos*. – 2012. – V. 148. – P. 312–336.
2. Архейская тоналит-трондьемит-гранодиоритовая ассоциация Курского блока, Воронежский кристаллический массив: состав, возраст и корреляция с комплексами Украинского щита / К. А. Савко [и др.] // *ДАН*. – 2018. – Т. 478. – № 3. – С. 335–341.
3. *Samsonov, A. V.* Geochronology and petrogenesis of an Archaean acid volcano-plutonic suite of the Verchovtsevo greenstone belt, Ukrainian Shield / A. V. Samsonov, D. Z. Zhuravlev, E. V. Bibikova // *International Geol. Review*. – 1993. – V. 35. – P. 1166–1181.
4. Evolution of the Archaean Aulian Gneiss Complex, Ukraine: SHRIMP U-Pb zircon evidence / A. V. Samsonov [et al.] // *Precam. Res.* – 1996. – V. 78. – P. 65–78.
5. *Shchipansky, A. A.* The Sarmatian crustal segment: Precambrian correlation between the Voronezh Massif and the Ukrainian Shield across the Dniepr-Donets Aulacogen / A. A. Shchipansky, S. V. Bogdanova // *Tectonophysics*. – 1996. – V. 268. – P. 109–125.
6. EUROBRIDGE: new insight into the geodynamic evolution of the East European Craton / S. Bogdanova [et al.] // *European Lithosphere Dynamics*. – London: Geological Society Memoirs, 2006. – V. 32. – P. 599–628.
7. *Gorbatshev, R.* Frontiers in the Baltic Shield / R. Gorbatshev, S. Bogdanova // *Precambrian Res.* – 1993. – V. 64. – P. 3–21.
8. Палеопротерозойские гранитоиды Тим-Ястребовской структуры Воронежского кристаллического массива: геохимия, геохронология и источники расплавов / К. А. Савко [и др.] // *Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология*. – 2014. – № 2. – С. 56–78.
9. Изотопная геохронология (U-Pb) и геохимия (Nd, Hf) неархейских риолитов и гранитов Курского блока, Восточная Сарматия: петрологические реконструкции для внутриплитных кислых магм / К. А. Савко [и др.] // *Методы и геологические результаты изучения изотопных геохронометрических систем минералов и пород: материалы VII Российской конф. по изотопной геохронологии*. – М.: ИГЕМ РАН. – 2018. – С. 304–306.
10. 2.6 Ga high-Si rhyolites and granites in the Kursk Domain, Eastern Sarmatia: Petrology and application for the Archaean palaeocontinental correlations / K. A. Savko [et al.] // *Precam. Res.* – 2019. – V. 322. – P. 170–192.
11. *Артеменко, Г. В.* Палеоархейский возраст ультраметаморфических плагиогранитоидов Курско-Бесединского блока (Воронежский кристаллический массив) / Г. В. Артеменко, И. А. Швайка, Е. А. Татарникова // *Геол. журн.* – 2006. – № 1. – С. 84–87.
12. Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое / А. А. Щипанский [и др.] // *Геотектоника*. – 2007. – № 1. – С. 43–70.
13. Ультрамафит-мафитовый магматизм гранит-зеленокаменной области КМА / В. Л. Бочаров [и др.] // *Воронеж: изд-во ВГУ*, 1993. – 176 с.
14. *Савко, К. А.* Минералогия, фазовые равновесия и условия метаморфизма пород неархейской железисто-кремнистой формации в пределах Тарасовских аномалий / К. А. Савко, С. М. Пилогин, М. А. Новикова // *Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология*. – 2004. – № 2. – С. 111–126.
15. *Савко, К. А.* Мезоархейские кислые вулканиды Курского блока, Воронежский кристаллический массив: состав, возраст и корреляция с Украинским щитом / К. А. Савко, А. В. Самсонов, А. Н. Ларионов // *ДАН*. – 2019. – В печати.
16. *Артеменко, Г. В.* Геохронологическая корреляция вулканизма и гранитоидного магматизма юго-восточной части Украинского щита и Курской магнитной аномалии / Г. В. Артеменко // *Геохимия и рудообразование*. – 1995. – Вып. 21. – С. 129–154.
17. *Larionov, A. N.* The Vendian alkaline igneous suite of northern Timan: ion microprobe U-Pb zircon ages of gabbros and syenite / A. N. Larionov, V. A. Andreichev, D. G. Gee // *The Neoproterozoic Timanide orogen of Eastern Baltica*. – London: Geological Society Memoirs, 2004. – V. 30. – P. 69–74.
18. *Krogh, T. E.* A low-contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determination / T. E. Krogh // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 1973. – V. 37. – P. 485–494.
19. *Mattinson, J. M.* A study of complex discordance in zircons using step-wise dissolution techniques / J. M. Mattinson // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1994. – V. 116. – P. 117–129.
20. *Ludwig, K. R.* PBDAT: A computer program for processing Pb–U–Th isotope data, version 1.20 / K. R. Ludwig // *Reston, Virginia: U.S. Geol. Surv. Open-File Report*, 1991. – 40 p.
21. *Ludwig, K. R.* User's manual for Isoplot/Ex version 3.00, a geochronological toolkit for Microsoft Excel / K. R. Ludwig // *Berkley: Berkley Geochronology Center Spec. Publ.*, 2003. – № 4. – 72 p.
22. *Steiger, R. H.* Subcommittee on geochronology: convention of the use of decay constants in geo- and cosmochronology / R. H. Steiger, E. Jäger // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1977. – V. 36. – P. 359–362.
23. *Stacey, J. S.* Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model / J. S. Stacey, J. D. Kramers // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1975. – V. 26. – P. 207–221.
24. *Black, L. P.* The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways Range, Northern Territory / L. P. Black, B. L. Gulson // *J. Aust. Geol. Geophys.* – 1978. – V. 3. – P. 227–232.
25. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology / S. E. Jackson [et al.] // *Chemical Geology*. – 2004. – V. 211. – P. 47–69.
26. *Giovanardi, T.* The Hf-INATOR: A free data reduction spreadsheet for Lu/Hf isotope analysis / T. Giovanardi, F. Lugli // *Earth Science Informatics*. – 2017. – P. 1–7.
27. Гранитоиды обрамления Криворожской структуры. Проблемы корреляции геологических тел и комплексов / Ю. Ф. Великанов [и др.] // *Геол. журн.* – 2012. – № 3. – С. 49–58.
28. Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Архей / Н. П. Щербак [и др.] // *Киев: Наук. думка*, 2004. – 243 с.
29. *Щербаков, И. Б.* Петрология Украинского щита / И. Б. Щербаков // *Львов: ЗУКЦ*, 2005. – 366 с.
30. *Артеменко, Г. В.* Позднепалеоархейские тоналитовые

гнейсы Западно-Приазовского блока (Приазовский мегаблок Украинского щита) / Г. В. Артеменко, Л. В. Шумлянский, И. А. Швайка // Геол. журн. – 2014. – № 4. – С. 91–102.

31. Возраст гранитоидов Славгородского блока / Г. В. Артеменко [и др.] // Доклады НАН Украины. – 2004. – № 8. – С. 118–123.

32. Татаринова, Е. А. U-Pb возраст тоналит-трондьемитовой ассоциации Гуляйпольского блока (западное Приазовье) / Е. А. Татаринова, В. А. Шпыльчак, Е. А. Бартницкий //

Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Геология. – 2001. – Вып. 12. – С. 131–136.

33. Возраст метаморфизма гранулитовых комплексов Воронежского кристаллического массива: результаты U-Pb геохронологических исследований монацита / К. А. Савко [и др.] // ДАН. – 2010. – Т. 433. – № 2. – С. 647–652.

34. The Early Precambrian Metamorphic Events in Eastern Sarmatia / K. A. Savko [et al.] // Precam. Res. – 2018. – V. 311. – P. 1–23.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Voronezh State University

Савко Константин Аркадьевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой полезных ископаемых и недропользования геологического факультета

E-mail: ksavko@geol.vsu.ru; Тел.: +7(473)222 64 19

Базиков Николай Сергеевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры полезных ископаемых и недропользования геологического факультета,

E-mail: nickolasss@yandex.ru; Тел.: +7(473)222 64 19

Кориш Екатерина Хафисовна, ведущий инженер лаборатории комплексных исследований

E-mail: korish_k@rambler.ru

Тел.: +7(473)222 64 19

Savko K. A., Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Chair of Mineral Resource, geological faculty

E-mail: ksavko@geol.vsu.ru

Tel.: +7(473)222 64 19

Bazikov N. S., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, associate Professor of the Mineral Resource Department, Geological faculty

E-mail: nickolasss@yandex.ru

Tel.: +7(473)222 64 19

Korish E. Kh., Lead Engineer of the Laboratory of Complex Research

E-mail: korish_k@rambler.ru

Tel.: +7(473)222 64 19

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва

Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM) RAS, Moscow

Самсонов Александр Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, зам. директора

E-mail: samsonov@igem.ru; Тел.: +7 (495) 951 45 79

Samsonov A. V., Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Deputy Director

E-mail: samsonov@igem.ru

Tel.: +7 (495) 951 45 79

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, г. Санкт-Петербург

Institute of Precambrian geology and geochronology RAS (IPGG RAS), Saint-Petersburg

Сальникова Екатерина Борисовна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории изотопной геологии

E-mail: esalnikova@peterlink.ru; Тел.: +7(812)328 48 01

Sal'nikova E. B., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher

E-mail: esalnikova@peterlink.ru

Tel.: +7(812) 328 48 01

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Всероссийский геологический институт им. Д. П. Карпинского, Центр изотопных исследований, г. Санкт-Петербург

Centre of Isotopic Research of A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint-Petersburg

Ларионов Александр Николаевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник

E-mail: alexander_larionov@vsegei.sp.ru

Тел.: +7(812)328 92 09

Larionov A. N., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher

E-mail: alexander_larionov@vsegei.sp.ru

Tel.: +7(812) 328 92 09

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук (ИГГ УрО РАН)

Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Russian Academy of Sciences Ural Branch

Червяковская Мария Владимировна, аспирант

E-mail: masha_vuf_91@mail.ru; Тел.: +7 (343) 287 90 10

Chervyakovskaya M. V., Post Graduate Student

E-mail: masha_vuf_91@mail.ru

Tel.: +7 (343) 287 90 10