

УДК 550.93(470.5)

DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-4-574-584

## ЦИРКОНЫ И ЦИРКОНОВАЯ ГЕОХРОНОЛОГИЯ ГАББРО НУРАЛИНСКОГО МАССИВА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2018 г. А. А. Краснобаев<sup>1</sup>, П. М. Вализер<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15, e-mail: krasnobaev@igg.uran.ru<sup>2</sup>Ильменский государственный заповедник, 456317, г. Миасс, Ильменский заповедник, e-mail: valizer@ilmeny.ac.ru

Поступила в редакцию 18.08.2017 г., принята к печати 02.10.2017 г.

*Объект исследования.* В статье приводятся результаты минералого-геохимического и изотопно-хронологического исследований цирконов из габбро Нуралинского массива. *Материалы и методы.* Амфиболовое габбро мелкозернистое массивной текстуры сложено роговой обманкой, основным плагиоклазом и эпидотом. Содержание РЗЭ в габбро существенно превышает их содержание в ультрамафитах массива. Содержание РЗЭ и РЭ в цирконах определялось методом вторичной ионной масс-спектропии на приборе CAMECA-IMS-4F. U-Pb возраст цирконов получен на микрозонде SHRIMP II. *Результаты.* Установлены различные варианты сложного многофазного зонального строения цирконов габбро. Наряду с широко известными классическими тонко- и грубозональными вариантами выделен новый тип зональности – “полигенный”. Он объединяет следы и первичного роста, и наложенных процессов. Основу вещественной эволюции цирконов составляет прогрессивное их рафинирование в процессе роста, снижение U, Th и РЗЭ в поздних генерациях. Эти изменения не выходят за пределы вариаций в границах единого геохимического пространства, обусловленного связью с единым источником. Механизм образования последовательных генераций цирконов отражает анатектическую природу габбро. Возраст цирконов габбро  $410.5 \pm 1.1$  млн лет при длительности процесса кристаллизации породы – 2.0–2.5 млн лет, что на 30–35 млн лет меньше возраста циркона лерцолитов. *Выводы.* Мы полагаем, что это свидетельствует об отсутствии генетических связей между габбро и ультрабазитами массива.

**Ключевые слова:** циркон, возраст, габбро, Нуралинский массив, Южный Урал

## ZIRCONS AND ZIRCON'S GEOCHRONOLOGY OF GABBRO NURALI MASSIF (THE SOUTHERN URALS)

Artur A. Krasnobaev<sup>1</sup>, Petr M. Valizer<sup>2</sup><sup>1</sup>A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky, Ekaterinburg, 620016, Russia, e-mail: krasnobaev@igg.uran.ru<sup>2</sup>Ilmeny State Reserve, Miass, 456317, Russia, e-mail: valizer@ilmeny.ac.ru

Received 18.08.2017, accepted 02.10.2017

*Object.* In the article presents the the results of mineralogy, geochemistry and isotope-chronological investigation of zircons from gabbro Nurali massif. *Materials and methods.* Amphibole gabbro is the fine-grained and massive texture rock, which consists of hornblende, the base plagioclase and epidote. The contents of REE in the gabbro significantly exceeds their content in associated ultramafites of the massif. The content of REE and trace elements in zircons was determined by the method of secondary ion mass spectroscopy on the CAMECA-IMS-4F device. U-Pb date of zircons was obtained on the SHRIMP II microprobe. *Results.* Different variants of complex multiphase zonal structure of gabbro zircons are established. Along with the well known classical fine- and coarse-zonal kinds, a new type of zoning – “polygenic” – is distinguished. It combines the features of both primary growth and superimposed processes. The basis of the material evolution of zircons is progressive process of growth of their refining, reduction of U, Th and REE in later generations. These changes do not go beyond the boundaries of a single geochemical space, due to the connection with a single source. The mechanism of formation of successive zircon generations reflects the anatectic origin of gabbro. The age of zircons from gabbro is  $410.5 \pm 1.1$  Ma for the duration of the process of crystallization of rock – 2.0–2.5 Ma. There is on 30–35 million years younger than the zircon from lherzolites of the massif. *Conclusion.* We consider that this indicates a lack of genetic links between them. The history of the development of gabbro is not associated with the formation of the ultramafic massif.

**Keywords:** zircon, U-Pb age, gabbro, Nurali massif, the Southern Urals

**Для цитирования:** Краснобаев А.А., Вализер П.М. (2018) Цирконы и цирконовая геохронология габбро Нуралинского массива (Южный Урал). *Литосфера*, 18(4), 574–584. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-4-574-584

**For citation:** Krasnobaev A.A., Valizer P.M. (2018) Zircons and zircon's geochronology of gabbro Nurali massif (the Southern Urals). *Litosfera*, 18(4), 574–584. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-4-574-584

ВВЕДЕНИЕ

Нуралинский массив (НМ) расположен в зоне Главного Уральского разлома в 30 км южнее г. Миасса (рис. 1). В его составе выделяются три последовательные серии пород: перidotитовая (дунит-гарцбургит-лерцолитовая), полосчатая (верлит-клинопироксенитовая) и расслоенная (габбро-диоритовая). Вопросы строения массива, его геодинамической позиции и состава пород подробно рассмотрены ранее [Рудник, 1965; Савельева, 1987, 2011; Ферштатер и др., 2000; Книппер и др., 2001; Попов и др., 2008]. Проблемным остается возраст образования и преобразования пород упомянутых серий. Информация о возрасте ультрамафитов противоречива. Известна Sm-Nd изохрона ( $578 \pm 18$  млн лет, СКВО = 1.3), воедино собравшая анализы и валовых проб (лерцолитов, клинопироксенитов), и монофракций минералов из них (клинно-, ортопироксенов) [Попов и др., 2008]. По сути вся история существования ультрамафитов НМ объединена здесь одной цифрой, что не может соответствовать действительности. Для габбро-диорита массива по двум навескам (1.6 и 3.0 мг) циркона из фракции 100–150 мкм по отношению  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  получена датировка  $399 \pm 2$  млн лет [Ферштатер и др., 2000]. Ее изотопные анализы расположены несколько правее конкордии, что не исключает занижение возраста. Подтверждением этой датировки могут служить данные Os-изотопии ( $415 \pm 30$ ,  $385 \pm 30$  млн лет), полученные для рудных минералов из ультрамафитов [Малич и др., 2016]. Согласно новым цирконовым данным, возраст лерцолитов НМ близок к 446 млн лет [Краснобаев и др., 2017]. В предлагаемой работе приведены результаты возрастных исследований цирконов габбро НМ.

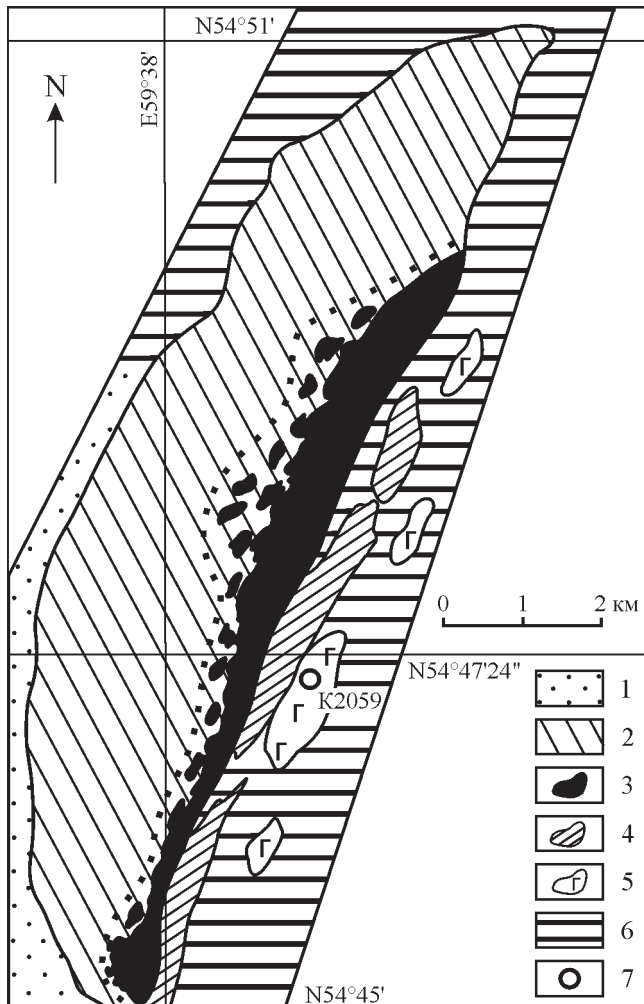


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Нуралинского массива [Рудник, 1965; Савельева, 1987].

1 – верхнепротерозойские отложения (кварциты, слюдяные сланцы); 2, 3 – перidotитовый блок (2 – шпинелевые, плагиоклазовые лерцолиты, 3 – дуниты, гарцбургиты); 4 – полосчатый комплекс (переслаивание дунитов, верлитов, клинопироксенитов); 5 – габбро, амфиболиты, диориты; 6 – серпентинитовый меланж; 7 – местоположение пробы K2059.

Fig. 1. Schematic geological map of the Nurali massif [Rudnik, 1965; Savel'eva, 1987].

1 – Archean-Early Proterozoic sedimentations (quarzites, mica-schists); 2, 3 – peridotite unit (2 – spinel-, plagioclase-lherzolites, 3 – dunites, harzburgites); 4 – foliated complex (bedding of dunites, verlites, clinopyroxenites); 5 – gabbro, amphibolites, diorites; 6 – mélange of serpentinites; 7 – location of sample K2059.

товая (дунит-гарцбургит-лерцолитовая), полосчатая (верлит-клинопироксенитовая) и расслоенная (габбро-диоритовая). Вопросы строения массива, его геодинамической позиции и состава пород подробно рассмотрены ранее [Рудник, 1965; Савельева, 1987, 2011; Ферштатер и др., 2000; Книппер и др., 2001; Попов и др., 2008]. Проблемным остается возраст образования и преобразования пород упомянутых серий. Информация о возрасте ультрамафитов противоречива. Известна Sm-Nd изохрона ( $578 \pm 18$  млн лет, СКВО = 1.3), воедино собравшая анализы и валовых проб (лерцолитов, клинопироксенитов), и монофракций минералов из них (клинно-, ортопироксенов) [Попов и др., 2008]. По сути вся история существования ультрамафитов НМ объединена здесь одной цифрой, что не может соответствовать действительности. Для габбро-диорита массива по двум навескам (1.6 и 3.0 мг) циркона из фракции 100–150 мкм по отношению  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  получена датировка  $399 \pm 2$  млн лет [Ферштатер и др., 2000]. Ее изотопные анализы расположены несколько правее конкордии, что не исключает занижение возраста. Подтверждением этой датировки могут служить данные Os-изотопии ( $415 \pm 30$ ,  $385 \pm 30$  млн лет), полученные для рудных минералов из ультрамафитов [Малич и др., 2016]. Согласно новым цирконовым данным, возраст лерцолитов НМ близок к 446 млн лет [Краснобаев и др., 2017]. В предлагаемой работе приведены результаты возрастных исследований цирконов габбро НМ.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проба (150–200 кг) амфиболового габбро (K2059) дробилась до фракции 0.25, сперва отмывалась, затем отмывалась в открытой воде от легкой фракции, освобождалась от магнитной и электромагнитной примесей. Остаточные “тяжелые” части пробы, объем которых обычно не превышал 0.2–0.5 см<sup>3</sup>, разбирались вручную под микроскопом. Выделенные таким образом цирконы исследовались с применением методики SHRIMP [Williams, 1998]. Получаемая при этом информация включала данные о содержании в них U и Th, различных изотопных соотношениях, в том числе определяющих их возрастные характеристики. Содержание РЗЭ в цирконах определялось методом вторично-ионной масс-спектропии на приборе CAMECA IMS-4F. Области сбора вторичных электронов – 25 мкм в диаметре. Измерения проводились в виде пяти циклов накопления сигнала и изменялись в зависимости от его интенсивности. Калибровочные кривые строились с помощью известных стандартов [Федотова и др., 2008]. Измерения РЗЭ в кристаллах осуществлялись в тех же точках, что и при U-Pb датировании. Микрозондовый анализ состава минералов выполнен на растровом микроскопе РЭММА-202М с микроанализато-

ром (аналитик В.А. Котляров). Содержание петрогенных, редких и редкоземельных элементов определено в ЦКП "Геоаналитик" ИГГ УрО РАН.

### АМФИБОЛОВОЕ ГАББРО

Амфиболовое габбро (K2059) – мелкозернистое, массивной текстуры. Сложено амфиболом, плагиоклазом, эпидотом, хлоритом. Акцессорные – апатит, мусковит, рудные минералы. Железомagneзиальная роговая обманка ( $\#Mg = 0.64-0.66$ ,  $Si^{4+} = 6.47-6.58$  к.ф.,  $Al^{VI} = 0.24-0.38$  к.ф. и  $Ca/(Ca + Na + K) = 0.76-0.81$ ) имеет низкое содержание октаэдрического алюминия и кальция. Основной плагиоклаз полностью изменен, сосюритизирован. В значительном количестве присутствует клиноцоизит ( $Fe/Fe + Al = 0.05-0.16$ ), альбит (№ 8) и железистый хлорит ( $\#Mg = 0.18$ ). По содержанию петрогенных элементов отобранная проба габбро практически не отличается от опубликованных данных (табл. 1). Содержание РЗЭ в габбро существенно превышает содержание редких земель в остальных породах массива, включая верлиты и клинопироксениты (рис. 2).

### МОРФОЛОГИЯ И ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЦИРКОНА

Цирконы образуют сообщество призматических и короткопризматических субидиоморфных или округлых кристаллов с искривленными гранями. У некоторых просматриваются размытые реберные границы, следы поверхностного растворения. В совокупности все зерна напоминают группу кристаллов, после голтовки, т. е. испытавших умеренную полировку (рис. 3).

В строении большинства кристаллов можно наблюдать признаки первичного роста и вторичного, связанного с различными изменениями. В кристалле А, представляющем практически единую зонную генерацию, проявляются несколько эта-

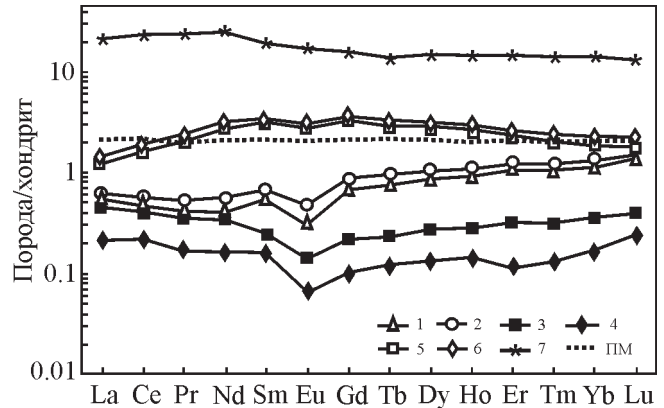


Рис. 2. Редкие земли в породах Нуралинского массива.

1, 2 – шпинелевые, плагиоклазовые лерцолиты; 3 – гарцбургиты; 4 – дуниты; 5 – верлиты; 6 – клинопироксениты; 7 – амфиболовое габбро. ПМ – примитивная мантия [Богатиков и др., 1987]. Нормированы по хондриту [McDonough, Sun, 1995].

Fig. 2. Chondrite-normalized rare earth elements for rocks of Nurali massif.

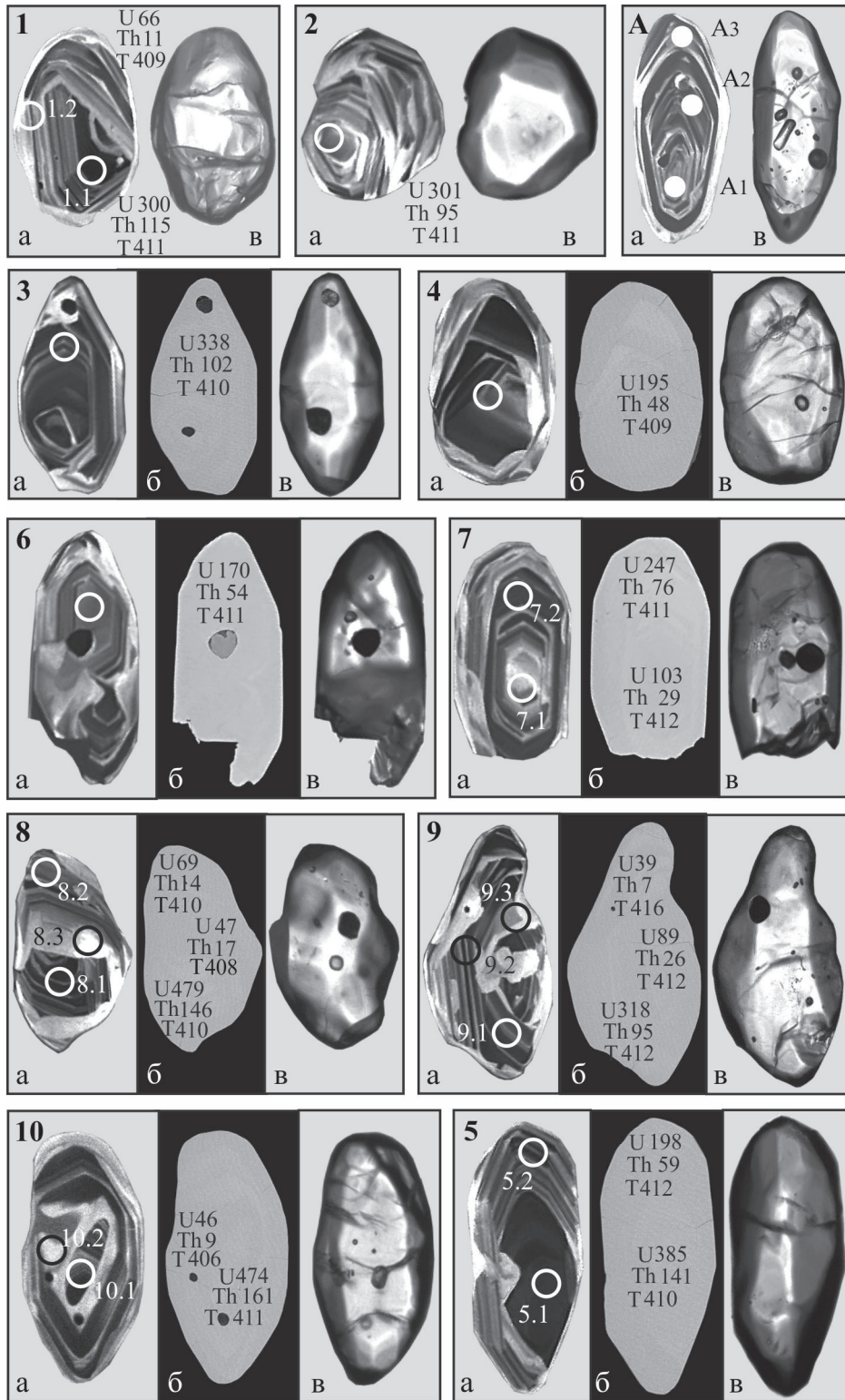
1, 2 – spinel-, plagioclase-lherzolites; 3 – harzburgites; 4 – dunites; 5 – verlites; 6 – clinopyroxenites; 7 – amphibole gabbro. ПМ – primitive mantle [Bogatikov et al., 1987]. The chondrite data are from [McDonough, Sun, 1995].

пов ее развития, причем каждому из них могут соответствовать и отдельные зерна, сохранившие детали первичного строения (см. рис. 3). Сопоставимым с ним является более сложный по строению кристалл 7, причем его темным (по CL) широким полосам (зонам) соответствуют ранние генерации кристаллов 3 и 4. Эффективным подтверждением сложной (черно-белой по CL) гетерогенности цирконов габбро НМ служит кристалл 5, у которого обе последовательные генерации сохранились почти в первозданном виде, хотя он

Таблица 1. Состав петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов габбро Нуралинского массива

Table 1. Composition of major (wt %), rare earth and trace elements (ppm) for gabbro of the Nurali massif

Компонент	K2059	Компонент	K2059	Компонент	K2059	Компонент	K2059	Компонент	K2059
SiO <sub>2</sub>	42.51	Li	4.45	Ge	1.20	Te	0.01	Dy	3.52
TiO <sub>2</sub>	1.00	Be	0.34	Rb	3.02	Cs	0.14	Ho	0.76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.81	Na	5275.00	Sr	581.00	Ba	80.49	Er	2.26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.46	Sc	31.56	Y	17.20	La	4.29	Tm	0.32
FeO	8.30	V	314.00	Zr	15.86	Ce	12.61	Yb	2.20
MnO	0.22	Cr	36.06	Nb	3.26	Pr	1.94	Lu	0.33
CaO	13.27	Co	27.47	Mo	0.50	Nd	9.77	Hf	0.70
MgO	7.03	Ni	24.00	Ag	0.11	Sm	2.63	W	0.78
Na <sub>2</sub> O	1.70	Cu	55.08	Cd	0.26	Eu	0.86	Bi	0.001
K <sub>2</sub> O	0.33	Zn	69.33	Sn	0.81	Gd	3.06	Th	0.03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.22	Ga	16.95	Sb	0.15	Tb	0.51	U	0.04



**Рис. 3.** Минералого-геохимические и возрастные особенности цирконов габбро Нуралинского массива.

Цифры – номера кристаллов, содержания U и Th, г/г; T – возраст, млн лет, по  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  (табл. 2): а, б – данные CL, BSE, в – оптики, проходящий свет. Кристалл А – анализы только РЗЭ и РЭ.

**Fig. 3.** Mineralogical, geochemical and geochronological characteristics of zircons from gabbro of the Nurali massif.

The numbers marked the numbers of crystals with the content of U and Th, ppm; T – the age by  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , Ma (Table 2): а, б – data CL and BSE, в – plain polarized light. Crystal A – only analysis of REE and TE.

испытал и поверхностное растворение, и замещение светлой (по CL) субстанцией, представляющей третью генерацию, “завоевавшую” незначительное пространство на границе двух первых. Активное развитие новых разновидностей цирконов может выражаться не только в периферических зонах кристаллов (кр. 4 и 6), но и в центральных (кр. 9 и 10). При этом у последнего реликт ранней зональной генерации, испытавшей и замещение, и растворение, полностью окружен третьей генерацией (см. рис. 3). Строение такого и подобных ему кристаллов служит основанием для выделения нового для цирконов “полигенного” типа зональности. Его специфику обеспечивает сосуществование в едином зерне и реликтов первичного строения, и приобретенных вторичных признаков (дробления, замещения). Причем эта вновь образованная конструкция кристалла может подвергаться и новым изменениям, связанным, например, с повторным растворением, нивелировкой занозистого рельефа дробления. Сказанное в полной мере относится и к кристаллу 8, у которого следы дробления ранней генерации сохранились наиболее отчетливо. Нельзя исключить, что облик некоторых кристаллов, подобных исследованным, при анализе только их оптических данных может восприниматься как

первичный (кр. 2, 3, 5, 10), что приведет к ошибочным выводам. Сложные взаимоотношения между генерациями в цирконах габбро, дополненные их асимметричным ростом, являются индикаторами активных изменений среды цирконообразования, в которой периодически возникают и разнонаправленные потоки, и объемы (зоны) различного состава с варьирующими *P-T* параметрами.

### ГЕОХИМИЯ U-Th В ЦИРКОНАХ

Геохимическую эволюцию цирконов габбро определяет тренд (Tr), который подтверждает принадлежность их к единому геохимическому пространству, обусловленному не только прямой взаимозависимостью U и Th, но и связью с единым для них источником (табл. 2, рис. 4). При этом наиболее поздние генерации цирконов, в том числе возникшие при замещении ранних, характеризуются пониженным содержанием U и особенно Th. Отсюда следует вывод, что их появление относится к заключительным этапам кристаллизации уже достаточно обедненной расплава, поскольку образование и смена генерации на более ранних этапах его развития (кр. 5.1, 5.2) включают в себя даже инверсионный вариант изменения состава цирконов

Таблица 2. U-Pb возраст цирконов из габбро Нуралинского массива

Table 2. U-Pb age of zircons from gabbro of the Nurali massif

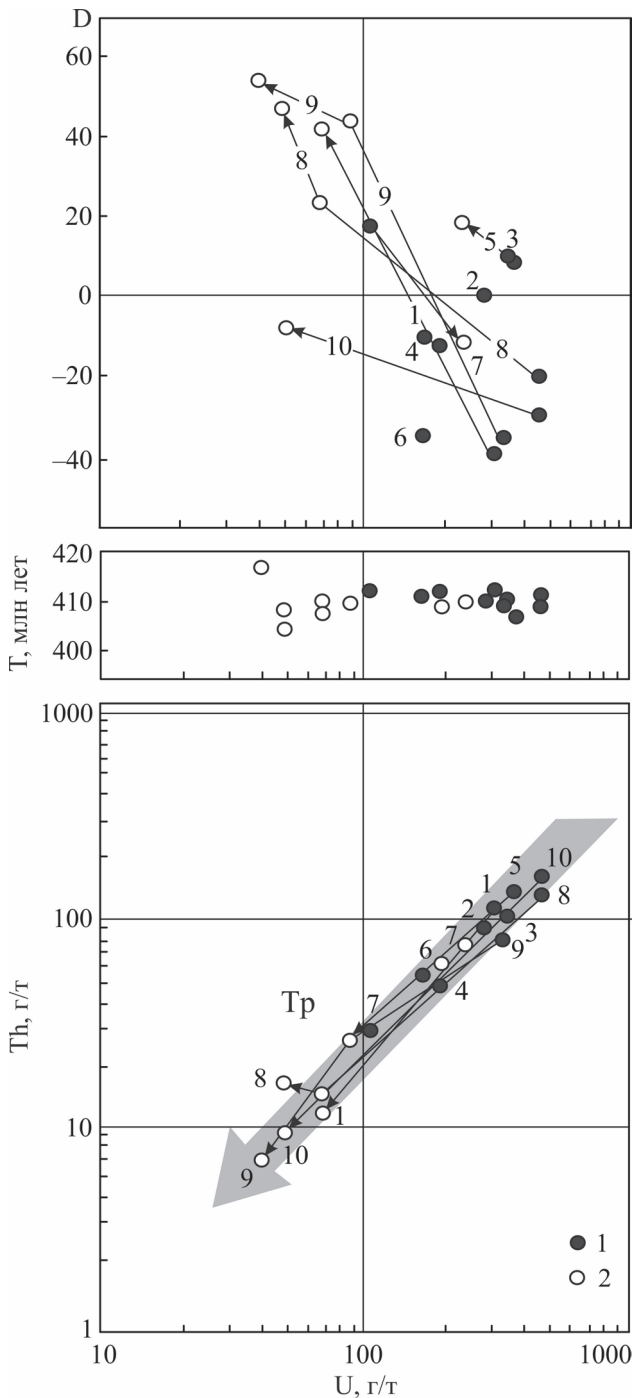
Анализ, кратер	<sup>206</sup> Pb <sub>c</sub> , %	Содержание, г/г			<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	Возраст, млн лет (1)	D, %	Изотопные отношения, ± %						Rho
		U	Th	<sup>206</sup> Pb*				<sup>206</sup> Pb*/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb*/ <sup>206</sup> Pb*	<sup>207</sup> Pb*/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb*/ <sup>238</sup> U			
1, 1	0.46	300	115	17.1	0.39	411.3 ± 6.1	-38	0.0514	6.0	0.467	6.2	0.06590	1.50	0.244
1, 2	1.12	66	11	3.7	0.17	409.3 ± 7.1	42	0.0594	9.3	0.537	9.5	0.06550	1.80	0.188
2	0.00	301	95	17.0	0.33	411.3 ± 3.7	1	0.0551	1.9	0.501	2.1	0.06589	0.93	0.434
3	0.46	338	102	19.2	0.31	410.6 ± 3.8	10	0.0560	4.0	0.508	4.1	0.06577	0.94	0.229
4	0.48	195	48	11.0	0.25	408.8 ± 4.3	-1	0.0549	4.8	0.495	5.0	0.06546	1.10	0.219
5, 1	0.00	385	141	21.7	0.38	409.6 ± 3.8	9	0.0558	1.8	0.505	2.1	0.06560	0.95	0.459
5, 2	0.00	198	59	11.2	0.31	411.7 ± 4.4	24	0.0575	2.5	0.523	2.8	0.06595	1.10	0.401
6	0.76	170	54	9.7	0.33	411.6 ± 4.1	-34	0.0517	4.9	0.47	5.0	0.06593	1.00	0.203
7, 1	0.00	103	29	5.8	0.29	412.1 ± 4.6	18	0.0569	2.9	0.517	3.1	0.06601	1.20	0.367
7, 2	0.00	247	76	13.9	0.32	410.5 ± 3.9	-12	0.0538	2.2	0.487	2.4	0.06576	0.99	0.406
8, 1	0.13	479	146	27.1	0.31	409.7 ± 3.6	-19	0.0531	2.0	0.480	2.2	0.06562	0.91	0.408
8, 2	0.00	69	14	3.9	0.21	410.2 ± 5.5	24	0.0575	3.6	0.521	3.9	0.06570	1.40	0.355
8, 3	0.00	47	17	2.6	0.37	408.4 ± 6.7	50	0.0603	2.2	0.544	2.8	0.06540	1.70	0.602
9, 1	0.98	318	95	18.2	0.31	412.1 ± 3.7	-33	0.0518	4.7	0.471	4.8	0.06602	0.92	0.190
9, 2	0.00	89	26	4.9	0.30	409.5 ± 7.4	43	0.0595	3.2	0.538	3.7	0.06560	1.90	0.510
9, 3	0.00	39	7	2.2	0.19	416.9 ± 7.6	55	0.0612	4.5	0.564	4.9	0.06680	1.90	0.383
10, 1	0.45	474	161	26.9	0.35	410.9 ± 3.3	-29	0.0522	2.8	0.473	2.9	0.06581	0.84	0.286
10, 2	0.00	46	9	2.5	0.20	406.9 ± 7.4	-5	0.0544	5.2	0.488	5.5	0.06520	1.90	0.336

(1) Коррекция по <sup>204</sup>Pb.

Примечание. Pb<sub>c</sub> и Pb\* – общий и радиогенный свинец. Rho – коэффициент корреляции. D – дискордантность. Ошибка калибровки стандарта 0.63%.

(1) The correction by <sup>204</sup>Pb.

Note. Pb<sub>c</sub> and Pb\* – total and isotopic lead. Rho – the coefficient of correlation. D – the discordance. The calibration error of the standard is 0.63%.



**Рис. 4.** Корреляция U–Th, U–T, U–D в цирконах габбро Нуралинского массива.

Линиями соединены анализы для ранних (1) – поздних (2) генераций. Тренд Тр – эволюция цирконов. U, Th, г/г; T – возраст, млн лет, по  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ; D – %. Аналитические данные см. в табл. 2, 3.

**Fig. 4.** The correlation U–Th, U–T, U–D for zircons from gabbro of the Nurali massif.

The lines connected analysis of early (1) – late (2) generation of zircons. Trend (Tr) is the evolution of zircons. U, Th, ppm; T – the age by  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , Ma; D – %. Data are from Table 2, 3.

(кр. 7.1, 7.2). Причина подобных взаимоотношений U и Th в сосуществующих генерациях цирконов определяется анатектической природой габбро НМ, при которой содержание примесей в расплаве и, соответственно, в цирконах по мере дальнейшего развития процессов его кристаллизации постепенно снижается.

Особое внимание привлекает корреляция U и дискордантности D (см. табл. 2, рис. 4), которая демонстрирует отчетливую связь минимальных содержаний U и Th в цирконах с их повышенной дискордантностью. Однако при этом весьма неожиданно выглядит близость всех (!)  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  датировок отдельных кристаллов к единому возрастному уровню (см. табл. 2, рис. 4). Создается впечатление, что и уменьшение U и Th в цирконах, и возрастание их дискордантности с возрастом связаны весьма опосредованно. Одной из вероятных причин таких вариаций может быть “промежуточный” статус новых разновидностей, не достигших конечного устойчивого состояния, свойственного полностью закончившим преобразованием генерациям. Механизм этих трансформаций может отражать влияние более сложно организованных функциональных связей, создающих основу для стабилизации синхронных преобразований цирконовой матрицы с одновременным проявлением “закономерной дискордантности” (ЗД) (см. рис. 4, U–Th, U–D). Альтернативой этому можно считать развитие кристалла 7, у которого возрастание U в поздней генерации совпадает с уменьшением ее дискордантности, что свойственно вообще большинству цирконов, связанных с кристаллизационной дифференциацией расплава. Снижение дискордантности у генерации 10.2 кристалла 10, вероятно, отражает достижение предельных (конечных) условий преобразования, обеспечивших возникновение уже третьей реальной генерации, “перекрывающей” обе первые. Этот третий этап цирконообразования в габбро НМ и завершает их эволюцию.

#### РЗЭ И РЭ В ЦИРКОНАХ

Спектры редких земель практически всех кристаллов, включая их отдельные зоны, характеризуются внешним сходством и по содержанию, и по структуре, а присутствие у них цериевой и европиевой аномалий ( $\text{Ce}^*$ ,  $\text{Eu}^*$ ) при повышенном содержании РЗЭ отражает их магматическую природу. Тем не менее незначительные вариации у них в области ЛРЗЭ все-таки заметны, что указывает на слабо выраженные вторичные изменения (табл. 3, рис. 5).

Спектры РЗЭ трех последовательных зон кристалла А (см. рис. 3) практически совпадают, что подтверждает отсутствие изменений в составе расплава за время его роста. Подобное сходство проявляется и при сравнении спектров РЗЭ этих зон со спектром РЗЭ поздней генерации 5.2 кристалла 5.

Таблица 3. Содержание РЗЭ в цирконах габбро Нуралинского массива (г/т)

Table 3. The contents rare earth elements for zircons from gabbro of the Nurali massif (ppm)

Компонент	Кристалл										
	9			8			5		A		
	9.3	9.2	9.1	8.1	8.2	8.3	5.1	5.2	A.1	A2	A3
La	0.10	0.12	0.21	0.20	0.11	0.12	0.30	0.15	0.13	0.11	0.11
Ce	3.80	3.60	12.00	27.60	5.00	5.50	13.30	9.70	9.70	8.80	8.10
Pr	0.03	0.03	0.07	0.12	0.03	0.06	0.07	0.05	0.04	0.05	0.04
Nd	0.22	0.21	0.76	1.29	0.29	0.34	0.98	0.53	0.57	0.49	0.40
Sm	0.45	0.40	1.70	3.20	0.66	0.54	2.20	1.30	1.30	1.00	0.90
Eu	0.21	0.18	0.90	1.78	0.29	0.28	1.17	0.57	0.58	0.57	0.44
Gd	2.78	2.80	12.98	27.84	4.40	3.90	15.46	9.73	9.26	6.80	6.50
Dy	16.20	17.50	78.20	138.70	27.00	25.00	89.90	56.90	56.50	38.00	36.00
Er	52.70	54.50	254.90	386.80	95.00	73.00	297.20	185.50	177.00	118.00	118.00
Yb	160	159	661	925	269	202	766	470	452	334	314
Lu	33.40	33.90	138.20	160.30	54.00	43.00	158.40	96.60	91.20	68.00	63.00
Li	0.04	0.58	0.02	0.05	0.418	0.71	0.02	0.05	0.01	0.40	0.07
Sr	0.19	0.81	0.67	0.89	7.35	0.09	0.39	0.39	0.57	0.50	0.36
Nd	0.22	0.21	0.76	1.29	0.29	0.34	0.98	0.53	0.57	0.49	0.40
Ba	1.23	3.00	0.94	1.11	27.75	2.98	0.80	1.52	1.56	1.07	1.70
Ca	0.67	15.82	3.68	2.66	57.71	34.80	0.92	1.00	1.05	14.68	1.40
Ti	4.11	5.96	8.36	10.64	5.27	10.63	7.86	6.92	5.30	6.40	6.10
Th	24.13	17.50	106.80	268.80	26.00	33.90	142.20	83.40	48.40	96.00	55.00
U	132.19	93.70	493.50	889.50	155.40	136.00	555.30	371.40	250.20	408.00	256.00
P	103.09	48.90	305.60	318.20	122.70	13.50	386.00	217.30	208.2	131.00	152.00
Y	263.02	269.00	1255.00	2084.00	468.00	328.00	1447.00	898.00	905.00	639.00	608.00
Hf	8327.94	7338.00	7877.00	8132.00	8057.00	8738.00	7298.00	8069.00	8273.00	7821.00	7294.00
(Sm/La) <sub>N</sub>	6.94	5.57	12.61	24.69	9.62	6.94	11.65	13.74	15.63	13.83	12.66
(Yb/La) <sub>N</sub>	2290.65	2032.16	4598.68	6660.56	3624.33	2387.23	3792.07	4579.42	5009.49	4329.98	4254.23
Ce*	15.96	14.14	23.36	42.01	21.01	15.87	21.84	27.51	34.26	27.48	28.65
Eu*	0.58	0.50	0.59	0.58	0.52	0.58	0.62	0.49	0.51	0.68	0.57

Примечание. (Sm/La)<sub>N</sub>, (Yb/La)<sub>N</sub>, Ce/Ce\*, Eu/Eu\* – нормированные по хондриту [McDonough, Sun, 1995]. Ce/Ce\* = Ce/(La × Pr)<sup>1/2</sup>, Eu/Eu\* = Eu/(Sm × Gd)<sup>1/2</sup>. Номера кристаллов и точек анализов см. в табл. 2 и на рис. 3.

Note. (Sm/La)<sub>N</sub>, (Yb/La)<sub>N</sub>, Ce/Ce\*, Eu/Eu\* – normalized to divide by chondrite [McDonough, Sun, 1995]. Ce/Ce\* = Ce/(La × Pr)<sup>1/2</sup>, Eu/Eu\* = Eu/(Sm × Gd)<sup>1/2</sup>. The numbers of crystals and points of analysis see et Table 2, Fig. 3.

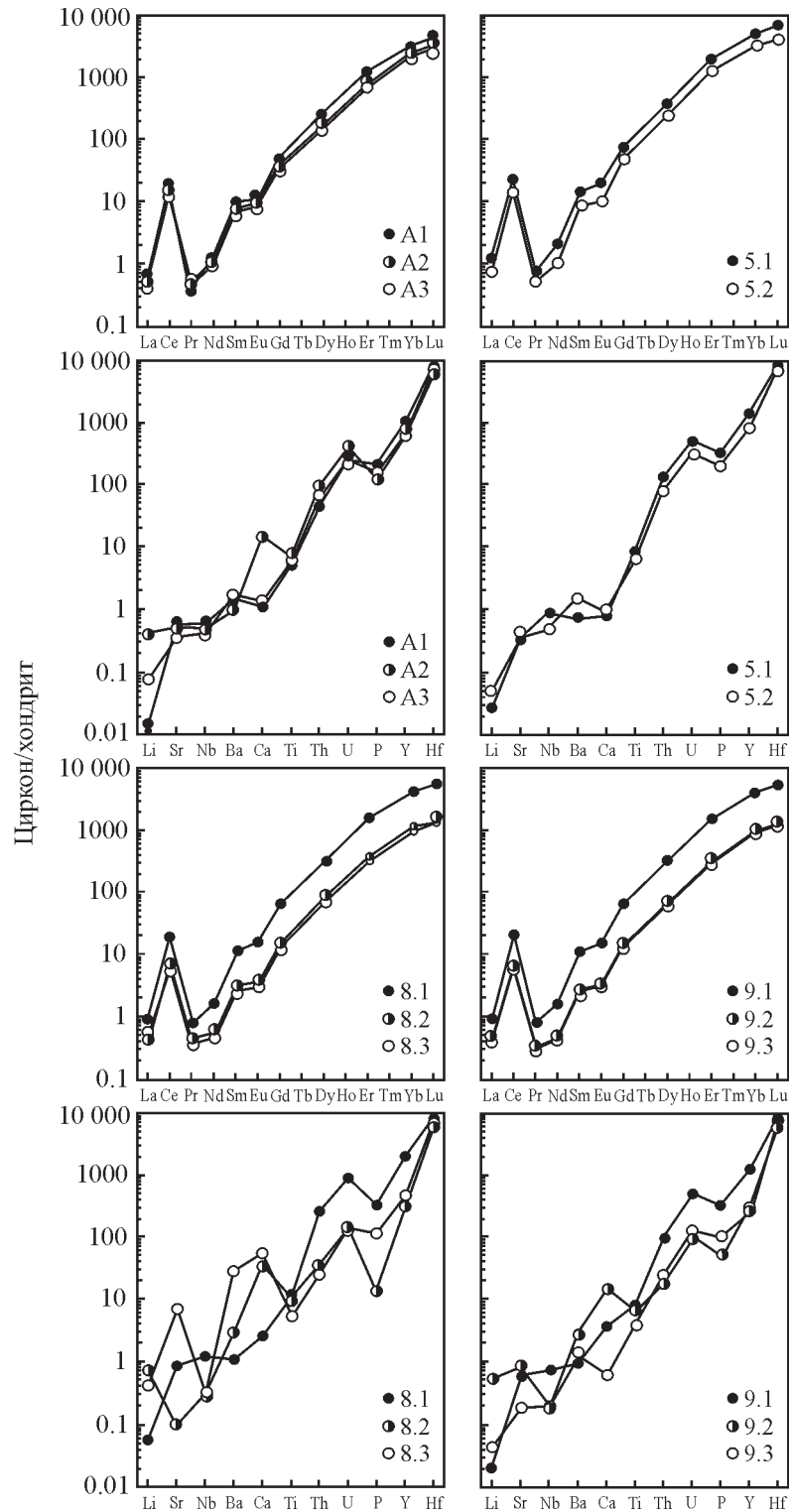
Состав ранней генерации 5.1 характеризуется повышенным содержанием редких земель, т. е. представляет собой расплав, еще обогащенный этими элементами. В преобразованиях кристаллов 8 и 9, вероятно, участвовали метасоматические (автометасоматические) растворы, обладающие повышенной агрессивностью при низком содержании РЗЭ того же спектрального состава. Судя по датировкам единичных кристаллов (см. рис. 4), речь идет об ограниченном временном интервале, включающем в себя и их образование, и их преобразование.

Новая информация появляется и при анализе распределения в цирконах некоторых редких элементов (РЭ) (см. табл. 3, рис. 5), которым ранее не уделялось должного внимания. Оказалось, что ранние генерации цирконов обычно обогащены Nb, Th, U, Y, P, для поздних более характерны Li, Ba, Ca, иногда Sr, а Hf остается практически постоянным. Подобие спектров РЗЭ в магматических разностях цирконов (кр. А, 5) повторяется и в распределении РЭ, а метасоматические процессы не толь-

ко влияют на распределение РЗЭ, но и вызывают перераспределение РЭ.

На основании сопоставления данных по титановой термометрии цирконов [Падерин, Левский, 2009; Ewing et al., 2013] кристалл А образован при температуре 690–710°C, ранние генерации кристаллов 8 и 9 – при 720–740°C. Появление кристалла 5 соответствует промежуточным (700–720°C) температурам.

Генетическая информативность РЗЭ в цирконах наиболее наглядно проявляется в их отдельных сочетаниях (координатах Хоскина) [Hoskin, Schaltegger, 2003; Hoskin, 2005] (рис. 6). Анализы практически всех кристаллов находятся в зоне магматического типа (М), но непосредственно с ним контактирует только ранняя самая высокотемпературная генерация 8.1 кристалла 8. В координатах Sm/La–Ce/Ce\* отчетливо проявился и конечный результат в эволюции цирконов – смешение их анализов в сторону Н-типа (Тр, см. рис. 6). Возникает парадоксальная ситуация в эволюции цирконов, когда



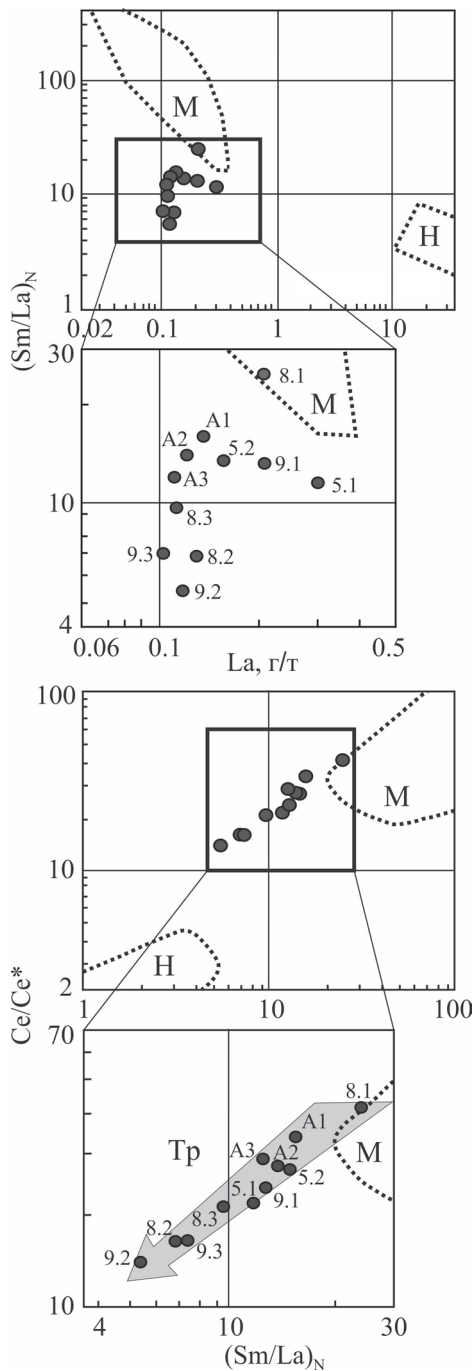
**Рис. 5.** Распределение РЗЭ и РЭ в цирконах габбро Нуралинского массива (см. табл. 3).

Номера кристаллов и точки анализа совпадают с использованными при определениях возраста (см. табл. 2, рис. 3). Нормировано по хондриту [McDonough, Sun, 1985].

**Fig. 5.** Chondrite-normalized rare earth elements and trace elements for zircons from gabbro of the Nurali massif (see Table 3).

The numbers of crystals and points of analysis coincides with the abbreviations for Table 2, Fig. 3. The chondrite data are from [McDonough, Sun, 1995].



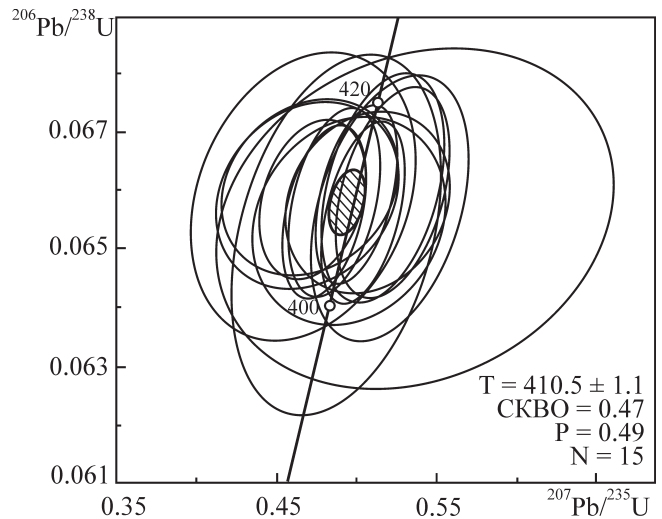


**Рис. 6.** Редкие земли в цирконах как индикаторы их происхождения.

Номера кристаллов см. в табл. 2, анализы – в табл. 3. Тр – тенденция эволюции цирконов от ранних генераций магматического (М) типа к поздним преобразованным гидротермального (Н) типа [Hoskin, Schaltegger, 2003; Hoskin, 2005].

**Fig. 6.** The rare earth elements from zircons as indicators of their origin.

The numbers of crystals – see Table 2, data of analysis – Table 3. Тр – the trend of evolution of zircons from early magmatic type (M) to late hydrothermal type (H) generation [Hoskin, Schaltegger, 2003; Hoskin, 2005].



**Рис. 7.** U-Pb возраст цирконов габбро Нуралинского массива.

**Fig. 7.** U-Pb age of zircon from gabbro of the Nurali massif.

ни появление поздних генераций с низким содержанием U и Th, ни сопровождаемое их рост увеличение discordance (см. рис. 4), ни изменения в распределении РЗЭ (Тр, см. рис. 6) в совокупности не оказывают серьезного воздействия на итоговый результат (рис. 7). Можно допустить, что при таком сочетании процессов преобразования ранних генераций цирконов значимое влияние оказывает время, с которым напрямую связано повышение поглощенной дозы  $\alpha$ -излучения, вызывающего деструкцию цирконовой матрицы.

## ВОЗРАСТ ЦИРКОНОВ

Отмеченные ранее датировки диоритов ( $399 \pm \pm 2$  млн лет) и Os-изотопии (415, 435 млн лет) не решают проблему возраста габбро. К сожалению, наиболее значимым остались цифры 467 и 410 млн лет, определяющие возраст образования и метаморфизма нуралинских пород [Книппер и др., 2001]. Они получены по ядрам и оболочкам(?) цирконов из пироксенитов Миндякского массива, но какая-либо информация о строении этих цирконов отсутствует, хотя хорошо известно, что установление ядер в кристаллах требует специального обоснования. Без особых колебаний эту миндякскую цирконологию от пород Нуралинского массива следует убрать, поскольку реальной возрастной информации для него она не содержит.

В табл. 2 приведены изотопные данные для 18(!) кристаллов цирконов габбро, для которых предварительно получено подробное минералогическое описание, учитывающее специфику их образования, дробления, растворения, замещения. Без ана-

лизов нескольких “крайних” наиболее измененных кристаллов (8.3, 9.2, 9.3) возраст оставшихся 15, формирующих плотный возрастной кластер, определен равным  $410.5 \pm 1.1$  млн лет (см. рис. 7). Магматическая природа цирконов позволяет говорить о возрастной близости их с окончанием кристаллизации и самого габбро. Согласно датировкам единичных кристаллов (см. табл. 2, рис. 4), длительность становления габбровой интрузии НМ составляет 2.0–2.5 млн лет. Принципиальным остается вопрос о соотношении возраста габбро с таковым лерцолитов (446 млн лет) [Краснобаев и др., 2017]. Напомним, что подобные возрасты отмечены ранее для ультрамафитов Нижне-Тагильского, Восточно-Тагильского и Ключевского массивов. Из полученных для НМ данных следует вывод об отсутствии не только возрастной связи между лерцолитами и габбро, но, вероятно, и генетической, т. е. интрузия габбро представляла собой самостоятельный породный комплекс, возникновение и эволюция которого происходили вне связи с лерцолитовым блоком. По-видимому, их сонахождение в границах НМ обусловлено тектоническим скупиванием и вопрос о природе габбро в упомянутых массивах приобретает большое значение с учетом их иной формационной принадлежности.

## ВЫВОДЫ

1. Среди широко известных для цирконов классических тонко- и грубозональных вариантов установлен новый тип зональности – “полигенный”. Он объединяет следы и первичного роста, и вторичных преобразований (дробления, растворения и замещения), произвольно расположенных в разных частях кристалла.

2. Основу эволюции цирконов габбро составляет прогрессивное снижение U, Th и РЗЭ в поздних генерациях, сопровождаемое возрастанием дискордантности. Возможен и инверсионный тип распределения зон с различным содержанием примесей.

3. К типично магматическому типу относятся лишь единичные зерна. Процессы автометаморфизма вносят незначительные изменения в состав цирконов габбро, смещая анализы в сторону гидротермального типа. Однотипное распределение РЗЭ и РЭ в цирконах служит признаком не только их магматической природы, но и высокой сохранности.

4. Возраст цирконов габбро НМ ( $410.5 \pm 1.1$  млн лет) превышает датировку диоритов, но на 30–35 млн лет меньше возраста циркона лерцолитов. Полагаем, что это свидетельствует и об отсутствии генетических связей между ними. История развития габбро НМ не связана с образованием ультрамафитов массива.

5. Механизм образования ранних и поздних генераций цирконов отражает анатектическую природу габбро НМ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богатиков О.А., Косарева Л.В., Шарков Е.В. (1987) Средние химические составы магматических горных пород. М.: Недра, 152 с.
- Книппер А.Л., Шараскин А.Я., Савельева Г.Н. (2001) Геодинамические обстановки формирования офиолитовых разрезов разного типа. *Геотектоника*, (4), 3-21.
- Краснобаев А.А., Русин А.И., Анфилов В.Н., Вализер П.М., Бушарина С.В., Медведева Е.В. (2017) Цирконология лерцолитов Нуралинского массива. *Докл. АН*, **474**(5), 593-598.
- Малич К.Н., Аникина Е.В., Баданина И.Ю., Белосусов Е.А., Пушкарев Е.В., Хиллер В.В. (2016) Вещественный состав и осмиевая изотопия первичных и вторичных ассоциаций минералов платиновой группы магнезиальных хромитов Нуралинского лерцолитового массива (Ю. Урал, Россия). *Геол. рудн. месторождений*, **58**(1), 3-22.
- Падерин И.П., Левский Л.К. (2009). Титановая термометрия по цирконам. *Изотопные системы и время геологических процессов. Т. II*. СПб.: ИГГД РАН, 74-77.
- Попов В.С., Кременецкий А.А., Беляцкий Б.В. (2008) Доордовикский Sm-Nd изотопный возраст ультрамафических пород в офиолитовых поясах Урала: уточненные данные. “Структурно-вещественные комплексы и проблемы геодинамики докембрия фанерозойских офиолитов”. Мат-лы Междунар. науч. конф. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 100-103.
- Рудник Г.Б. (1965) Петрогенезис ультраосновных пород Нуралинского массива на Южном Урале. *Соотношение магматизма и метаморфизма в генезисе ультрабазитов*. М.: ИГЕМ АН СССР, 68-101.
- Савельева Г.Н. (1987) Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре. М.: Наука, 245 с.
- Савельева Г.Н. (2011) Офиолиты варисцид Европы и уралит: обстановки формирования и метаморфизм. *Геотектоника*, (6), 24-39.
- Федотова А.А., Бибикова Е.В., Симакин С.Г. (2008) Геохимия циркона (данные ионного микрозонда) как индикатор генезиса минерала при геохронологических исследованиях. *Геохимия*, (9), 980-997.
- Ферштатер Г.Б., Котов А.Б., Смирнов С.В., Пушкарев Е.В., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Яковлева С.З., Бережная Н.Г. (2000) U-Pb-возраст циркона из диорита Нуралинского лерцолит-габбрового массива на Южном Урале. *Докл. АН*, **371**(1), 96-100.
- Ewing T.A., Hermann J., Rubatto D. (2013) The robustness of the Zr-in-rutile and Ti-in-zircon thermometers during high-temperature metamorphism (Ivnea-Vevbauo Zone, Northern Italy). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **165**, 757-779.
- Hoskin P.W. (2005) Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alternation of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**(3), 637-648.
- Hoskin P.W., Schaltegger O. (2003) Zircon. *Rev. Mineral. Geochem.*, **53**, 27-55.
- McDonough W.F., Sun S.S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, 223-253.
- Williams I.S. (1998) U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. Applications in microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. *Rev. Econ. Geol.*, **7**, 1-35.

## REFERENCES

- Bogatikov O.A., Kosareva L.V., Sharkov E.V. (1987) *Srednie khimicheskie sostavy magmaticheskikh gornykh porod* [Mean chemical compositions of igneous rocks]. Moscow, Nedra Publ., 152 p. (In Russian)
- Ewing T.A., Hermann J., Rubatto D. (2013) The robustness of the Zr-in-rutile and Ti-in-zircon thermometers during high-temperature metamorphism (Ivnea-Vevbauo Zone, Northern Italy). *Contrib. Miner. Petrol.*, **165**, 757-779.
- Fedotova A.A., Bibikova E.V., Simakin S.G. (2008) Geochemistry of zircon (data of an ion microprobe) as an indicator of the genesis of a mineral under geochronological studies. *Geokhimiya*, (9), 980-997. (In Russian)
- Fershtater G.B., Kotov A.B., Smirnov S.V., Pushkarev E.V., Sal'nikova E.B., Kovach V.P., Yakovleva S.Z., Berezhnaya N.G. (2000) U-Pb-age of zircon from the diorite of the Nuralinsky lherzolite-gabbro massif in the Southern Urals. *Dokl. AN*, **371**(1), 96-100. (In Russian)
- Hoskin P.W. (2005) Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alternation of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **69**(3), 637-648.
- Hoskin P.W., Schaltegger O. (2003) Zircon. *Rev. Mineral. Geochem.*, **53**, 27-55.
- Knipper A.L., Sharas'kin A.Ya., Savel'eva G.N. (2001) Geodynamic environments for the formation of ophiolite sections of various types. *Geotektonika*, (4), 3-21. (In Russian)
- Krasnobaev A.A., Rusin A.I., Anfilogov V.N., Valizer P.M., Busharina S.V., Medvedeva E.V. (2017). Zirconology of lherzolites of the Nuralinsky massif. *Dokl. AN*, **474**(5), 593-598. (In Russian)
- Malich K.N., Anikina E.V., Badanina I.Yu., Belousov E.A., Pushkarev E.V., Hiller V.V. (2016) Material composition and osmium isotopy of primary and secondary associations of minerals of the platinum group of magnesian chromites of the Nuralinsky lherzolite massif (the Southern Urals, Russia). *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **58**(1), 3-22. (In Russian)
- McDonough W.F., Sun S.S. (1995) The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, **120**, 223-253.
- Popov V.S., Kremeneckij A.A., Belyackij B.V. (2008) Pre-Ordovician Sm-Nd isotope age of ultramafic rocks in the ophiolite belts of the Urals: updated data. "Strukturalno-vestchestvennye komplekxy i problemy geodinamiki dokembriya fanerozoiskikh ofiolitov". *Materialy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* ["Structural-material complexes and problems of Precambrian geodynamics of Phanerozoic ophiolites". Materials of the International Scientific Conference]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN Publ., 100-103. (In Russian)
- Rudnik G.B. (1965) Petrogenesis of ultrabasic rocks of the Nuralinsky Massif in the Southern Urals. *Sootnoshenie magmatizma i metamorfizma v genezise ul'trabazitov* [The ratio of magmatism and metamorphism in the genesis of ultrabasites]. Moscow, IGEM AN SSSR Publ., 68-101. (In Russian)
- Savel'eva G.N. (1987) *Gabbro-ul'trabazitovye komplekxy ofiolitov Urala i ikh analogi v sovremennoi okeanicheskoi kore* [Gabbro-ultrabasic complexes of ophiolites of the Urals and their analogues in the modern oceanic crust]. Moscow, Nauka Publ., 245 p. (In Russian)
- Savel'eva G.N. (2011) Ophiolites varisid of Europe and Uralid: formation conditions and metamorphism. *Geotektonika*, (6), 24-39. (In Russian)
- Williams I.S. (1998) U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. Applications in microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. *Rev. Econ. Geol.*, (7), 1-35.