Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 550.93:552.321(234.83)

DOI: 10.19110/geov.2021.6.2

Цирконология сиенитов Северного Тимана

В. Л. Андреичев¹, А. А. Соболева¹, О. В. Удоратина¹, Ю. Л. Ронкин²¹Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар;
andreichev@geo.komisc.ru, aa_soboleva@mail.ru, udoratina@geo.komisc.ru²Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург; y-ronrin@mail.ru

Сиениты на Северном Тимане прорывают метатерригенные породы неопротерозойской барминской серии и перекрываются известняками нижнего силура. Для установления возраста сиенитов проведено U–Pb датирование цирконов методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS). Конкордантный возраст цирконов из сиенитов массива Крайний Камешек составляет 602 ± 5 млн лет, а средневзвешенный $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст цирконов из сиенитов массива Малый Камешек – 598 ± 17 млн лет. Совокупность существующих в литературных источниках U–Pb (SIMS) датировок цирконов из распространенных на Северном Тимане щелочных магматических пород свидетельствует о том, что плюмовый магматизм проявился в эдиакарии в интервале 614–600 млн лет и мог быть связан с завершающими этапами распада Родинии.

Ключевые слова: сиениты, Северный Тиман, циркон, U–Pb изотопный возраст.

Zirconology of syenites of the Northern Timan

V. L. Andreichev¹, A. A. Soboleva¹, O. V. Udoratina¹, Yu. L. Ronkin²¹Institute of Geology, FRC Komi Science Center, UB RAS, Syktyvkar²Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg

Northern Timan is an uplifted block of the Upper Precambrian basement of the Timan Ridge, where intrusive rocks of various compositions cut Neoproterozoic metaterrigenous rocks of the Barmin Group and are overlain by Lower Silurian limestone. Syenites are widespread in the Cape Bolshoy Rumyanichny pluton and compose the Krayny Kameshek and Malyi Kameshek plutons. To determine the age of the syenites, U–Pb dating of zircons was carried out using secondary ion mass spectrometry (SIMS). The age of zircons from syenite of the Cape Bolshoy Rumyanichny pluton is 613 ± 7 Ma, Krayny Kameshek pluton – 602 ± 5 Ma, and Malyi Kameshek pluton – 598 ± 17 Ma. Similar zircon ages are known for other alkaline igneous rocks that occur within the Cape Bolshoy Rumyanichny pluton: olivine-kersutite gabbro – 614 ± 2 Ma, granites – 614 ± 11 Ma. Zircons from subalkaline granites of the Bolshoy Kameshek pluton are of the same age – 613 ± 6 Ma. The location of the plutons in the area of the Late Riphean passive margin of Baltica, the close association of subalkaline and alkaline granites, syenites, and alkaline gabbros indicate the anorogenic nature of these magmatic rocks and possible relationship with mantle plume activity. Ediacaran magmatic rocks of 614–600 Ma located in the Northern Timan could be associated with the final stages of Rodinia breakup, accompanied by plume-related magmatism, the products of which are also known in the eastern part of Laurentia and in the Scandinavia.

Keywords: syenite, Northern Timan, zircon, U–Pb isotopic age.

Введение

Северный Тиман представляет собой горстообразный выступ тиманид в составе Тиманской гряды, где на сравнительно небольшой территории (рис. 1) выходят на поверхность магматические породы разного состава: долериты, габбро-долериты, граниты, сиениты, оливин-керсутитовые габбро, щелочные габброиды [7, 8, 10, 13, 14]. Все они прорывают метатерригенные отложения неопротерозойской барминской серии и перекрываются известняками лландоверийского яруса нижнего силура.

Сиениты распространены в районе мыса Большой Румяничный и слагают сопки Крайний Камешек и

Малый Камешек (рис. 1). Оценка времени их формирования современными методами является весьма актуальной задачей, поскольку длительное время суждения об их возрасте основывались на K–Ar определениях [1, 7, 9, 15] и лишь с конца прошлого века стала накапливаться информация по твердофазным изотопно-геохронометрическим системам.

Вначале сиениты были охарактеризованы Rb–Sr возрастными по валовому изотопному составу, свидетельствующими об их формировании в венде (эдиакарии) [2]. Изохронный возраст сиенитов массива мыса Большой Румяничный составил 590 ± 5 млн лет ($n = 6$, $I_{\text{Sr}} = 0.70431 \pm 0.00027$, СКВО = 0.19), а массива Крайний

Для цитирования: Андреичев В. Л., Соболева А. А., Удоратина О. В., Ронкин Ю. Л. Цирконология сиенитов Северного Тимана // Вестник геонаук. 2021. 6(318). С. 16–27. DOI: 10.19110/geov.2021.6.2.

For citation: Andreichev V. L., Soboleva A. A., Udoratina O. V., Ronkin Yu. L. Zirconology of syenites of the Northern Timan. Vestnik of Geosciences, 2021, 6(318), pp. 16–27, doi: 10.19110/geov.2021.6.2.

Рис. 1. Схема геологического строения Северного Тимана по [11]:

1 — верхнедевонские базальты; 2 — среднедевонские песчаники и конгломераты; 3 — нижнедевонские алевролиты, песчаники, глины; 4 — нижнесилурийские известняки с прослоями алевролитов и песчаников; 5 — сланцы, кварциты, кварцитопесчаники барминской серии; 6 — граниты, 7 — сиениты, 8 — метагаббро-долериты и долериты, 9 — оливин-керсутитовые габбро, 10 — геологические границы: согласные и границы интрузивных тел (а), несогласные (b); 11 — главные разломы. Цифрами обозначены массивы: 1 — Большой Румяничный, 2 — Крайний Камешек, 3 — Малый Камешек, 4 — Большой Камешек, 5 — Сопки Каменные. Опубликованные U—Pb и Pb—Pb возраста цирконов (млн лет) подписаны рядом с массивами

Fig. 1. Schematic geological structure of the Northern Timan [11]:

1 — Upper Devonian basalt; 2 — Middle Devonian sandstone, conglomerate; 3 — Lower Devonian siltstone, sandstone, clay; 4 — Lower Silurian limestone with siltstone and sandstone interlayers; 5 — shale, quartzite, quartzite like sandstone of the Neoproterozoic Barmin Group; 6 — granite; 7 — syenite; 8 — metagabbro-dolerite, dolerite; 9 — olivine-kersutite gabbro; 10 — geological boundaries: a — between units with conformable bedding, and boundaries of intrusive bodies, b — unconformity; 11 — principal faults. Numbers refer to plutons: 1 — Cape Bolshoy Rumyanychny, 2 — Krayny Kameshek, 3 — Malyi Kameshek, 4 — Bolshoy Kameshek, 5 — Sopki Kamennyye. Published U—Pb and Pb—Pb zircon ages (Ma) are shown next to the plutons

Камешек — 603 ± 6 млн лет ($n = 6$, $I_{Sr} = 0.70447 \pm 0.00016$, $СКВО = 0.98$). Все приводимые в тексте погрешности соответствуют 2σ . Последующие исследования были связаны с Pb–Pb датированием единичных зерен циркона из сиенитов массива Крайний Камешек (обр. 137) по отношению радиогенных изотопов свинца методом ступенчатого испарения свинца (Pb-evaporation). Средневзвешенный $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст по 21 ступени в четырех зернах составил 613 ± 2 млн лет [3]. Он согласуется с Rb–Sr возрастом, но при Pb–Pb датировании отсутствует контроль конкордантности, поэтому для его обеспечения необходим U–Pb анализ цирконов. Первые результаты были получены по цирконам из сиенитов массива мыса Большой Румяничный методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) на ионном микрозонде SHRIMP-II в только что созданном Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ [23]. Конкордантный возраст по изотопным отношениям, измеренным в пяти зернах, составил 613 ± 7 млн лет (2σ , $СКВО = 3.4$). В нашей работе приводятся первые геохимические и изотопные (SIMS) данные по цирконам из сиенитов массивов Крайний Камешек и Малый Камешек.

Методы исследований

Определение концентраций породообразующих оксидов в породе выполнено методом классического химического анализа в химико-аналитической лаборатории Института геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктыв-

кар). Содержания элементов-примесей установлены методом ICP-MS в ЦКП «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН (г. Екатеринбург) и в Центральной лаборатории ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург).

U–Pb датирование цирконов методом SIMS выполнено на ионном микрозонде SHRIMP-RG в Центре микроанализа Стэнфордского университета и Геологической службы США согласно стандартным процедурам [19, 21]. Изображения цирконов получены там же на сканирующем электронном микроскопе JEOL LV 5600, оснащённом катодоллюминесцентным детектором. Обработка полученных аналитических данных произведена с использованием программы SQUID [24]. При построении графиков с конкордией в координатах $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ — $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ использована программа ISOPLOT/Ex [25].

Геологическое положение и петрографическая характеристика сиенитов

Массив Крайний Камешек. На сопке Крайний Камешек сиениты образуют небольшой массив площадью около 3–4 км² (рис. 2). Интрузивный контакт с метаморфическими сланцами наблюдается на востоке и северо-востоке. К западу от массива, по данным бурения, сиениты перекрыты нижнесилурийскими известняками. В центральной части массива среди сиенитов отмечаются крупный (200 × 150 м) ксенолит интенсивно сиенитизированных оливин-керсутитовых

Рис. 2. Схематическая геологическая карта массива Крайний Камешек по [2]:

1 — дайки сиенит-аплитов; 2 — биотитовые кварцевые сиениты; 3 — амфибол-биотитовые кварцевые сиениты; 4 — биотит-амфибол-кварцосодержащие щелочные сиениты; 5 — ксенолиты сиенитизированных оливин-керсутитовых габбро; 6 — ксенолиты кварцитов; 7 — дайки долеритов; 8 — сланцы и кварциты барминской серии; 9 — элементы залегания; 10 — контакты: а — установленные, b — предполагаемые; 11 — постепенные переходы: а — установленные, b — предполагаемые; 12 — места взятия образцов

Fig. 2. Schematic geological map of the Krayny Kameshek pluton [2]:

1 — syenite-aplite dikes; 2 — biotite quartz syenite; 3 — amphibole-biotite quartz syenite; 4 — biotite-amphibole-quartz-bearing alkaline syenite; 5 — xenoliths of syenitized olivine-kersutite gabbro; 6 — xenoliths of quartzites; 7 — dolerite dikes; 8 — schists and quartzites of the Barmin Group; 9 — strike and dip; 10 — contacts: a — established, b — assumed; 11 — gradual transitions: a — established, b — assumed; 12 — sampling sites

габбро, рассекаемый жилоподобными телами сиенитов. Габбро на контактах с сиенитами биотитизированы, полевошпатизированы, амфиболизованы.

Породы массива представлены в основном крупно- и среднезернистыми серыми и розовато-бурыми кварцевыми сиенитами, которые сменяются по направлению к контакту розовыми разновидностями. В зоне эндоконтакта со сланцами наблюдаются мелкозернистые окварцованные, флюоритизированные разновидности сиенитов. Породообразующие минералы представлены микроклином, биотитом, амфиболом, клинопироксеном и кварцем. Альбит, мусковит, эпидот, клиноцоизит, карбонат и кварц (частично) имеют вторичное происхождение.

Массив Малый Камешек площадью около 2 км² имеет в плане изометричную форму (рис. 3). Сиениты слагают два дайкообразных, ориентированных в северо-западном направлении тела мощностью около 100 м каждое, прорывающих метабазиты и метаморфические сланцы. Контакт сиенитов с метаморфическими сланцами, наблюдаемый в северо-восточной части сопки, четкий, интрузивный. Центральная часть массива

сложена интенсивно сиенитизированными метабазитами, преобразованными в апобазитовые сиениты. Процессы сиенитизации метабазитов затушевывают первично интрузивный контакт между вмещающими породами основного состава и внедрившимися щелочными породами, придавая ему вид постепенного перехода. Впоследствии все породы испытали катаклаз и милонитизацию и подверглись процессам кремнекислотного и натриевого метасоматоза (окварцевание, карбонатизация, мусковитизация), конечные продукты которого представлены альбититами.

Сиениты — массивные, средне- и крупнозернистые породы светло-серого или розового цвета. В центральных частях тел развиты нефелиновые сиениты, в зоне эндоконтакта со сланцами — безнефелиновые разновидности. Апобазитовые сиениты более меланократовые и мелкозернистые. Это массивные темно-серые с розовым оттенком породы, имеющие мелкозернистую структуру. Нередко сиениты приобретают гнейсовидный облик за счет развития ориентированных агрегатов биотита. Субширотная гнейсовидность параллельна плоскостям кливажа и милонитизации.

Рис. 3. Схематическая геологическая карта массива Малый Камешек по [8]:

1 — четвертичные отложения; 2 — альбититы; 3 — бластомилониты по апобазитовым сиенитам; 4 — зоны милонитизации; 5 — зоны интенсивного кливажа и разгнейсования пород; 6 — дайки сиенит-аплитов; 7 — биотитовые щелочные сиениты; 8 — биотит-амфиболовые нефелиновые сиениты; 9 — бескварцевые апобазитовые сиениты; 10 — окварцованные апобазитовые сиениты и сиенитизированные метабазиты; 11 — сланцы и кварциты барминской серии; 12 — элементы залегания; 13 — геологические границы (a — установленные, b — предполагаемые); 14 — постепенные переходы; 15 — места взятия образцов

Fig. 3. Schematic geological map of the Malyi Kameshek pluton after [8]:

1 — Quaternary sediments; 2 — albitite; 3 — blastomylonite after apobasite syenite; 4 — zones of mylonitization; 5 — zones of intense cleavage and gneissing of rocks; 6 — dykes of syenite-aplite; 7 — biotite alkaline syenite; 8 — biotite-amphibole nepheline syenite; 9 — quartz-free apobasite syenites; 10 — silicified apobasite syenite and syenitized metabasite; 11 — schists and quartzites of the Barmin Group; 12 — strike and dip; 13 — geological boundaries (a — established, b — assumed); 14 — gradual transitions; 15 — sampling sites

Структура сиенитов аллотриоморфнозернистая, реже гипидиоморфнозернистая. Нефелиновые сиениты сложены нефелином, канкринитом, содалитом и темноцветными минералами, представленными биотитом, амфиболами (гастингситом и феррогастингситом, рибекитом), клинопироксенами (ферроавгитом, эгирином). Акцессорные — циркон, апатит, титанит, гранат. Рудные минералы представлены магнетитом, ильменитом и пиритом, имеющими вторичное происхождение. К вторичным минералам относятся также альбит, мусковит, эпидот, клиноцоизит, карбонат, кварц, флюорит и лейкоксеновый агрегат. В альбитизированных разностях возрастает количество флюорита, появляются галенит, сфалерит, молибденит.

В центральной части массива сосредоточена основная часть альбититовых тел, которые залегают среди разгнейсованных апобазитовых сиенитов и приурочены к пересечениям зон кливажа и милонитизации. Отдельные тела альбититов наблюдаются в северо-восточной и северо-западной частях массива. Альбититы представляют собой массивные мелкозернистые, существенно альбитовые красно-розовые и желтовато-белые метасоматиты по бластомилонитам апобазитовых сиенитов.

Петрогеохимическая характеристика пород

Представительные анализы сиенитов приведены в табл. 1, составы пород показаны на рис. 4. Согласно петрохимической классификации плутонических пород породы массива Крайний Камешек относятся к сиенитам, щелочным сиенитам, кварцевым сиенитам и щелочным кварцевым сиенитам, а массива Малый Камешек — к сиенитам и щелочным (нефелиновым) сиенитам (рис. 4, а). Породы массива Крайний Камешек характеризуются содержанием (мас. %): SiO_2 — 61—65, Al_2O_3 — 15—17, $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ — 9—12 и имеют калиево-натриевый тип щелочности ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ — 0.7—1.1). Сиениты и нефелиновые сиениты массива Малый Камешек содержат (мас. %): SiO_2 — 57—59, Al_2O_3 — 18—19,

$(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ — 10—13 и по соотношению щелочей также являются калиево-натриевыми ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ — 0.8—1.1).

Породы массивов характеризуются достаточно высокими содержаниями редкоземельных элементов (РЗЭ) — 200—350 г/т и 137—367 г/т соответственно (табл. 2). Характерно преобладание легких РЗЭ над тяжелыми (рис. 4, б): La_N/Yb_N — 9—18 (Крайний Камешек), 8—28 (Малый Камешек). В породах слабо выражен или отсутствует дефицит европия: $\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^*$ — 0.5—1.0 (Крайний Камешек), 0.5—1.1 (Малый Камешек).

Мультиэлементные диаграммы, построенные для составов пород, нормированных на примитивную мантию, демонстрируют обогащение крупноионными литофильными элементами по отношению к высокозарядным, с разнонаправленными аномалиями Rb, Th, U, Y, Nb, Y, Zr, Ta, минимумами Ti, P, Sr и максимумами Cs, K, Pb (рис. 4, с).

Результаты и их обсуждение

Возраст массива Крайний Камешек определен по цирконам из щелочного сиенита (обр. 148). Зерна циркона крупные (150—450 мкм) с коэффициентом удлинения K_u — 1.5—2, светло-розовато-бурые, полупрозрачные. В них много внутренних трещин, вблизи поверхности зерен наблюдаются крупные черные включения неправильной формы. Грани цирконов гладкие, блестящие или чуть шероховатые. На катодолюминесцентных изображениях (рис. 5) почти во всех зернах видна темная широкая центральная часть, обросшая более светлой каймой шириной в крупных зернах до 150 мкм. В центральных частях некоторых зерен видна неконтрастная, еле заметная осцилляционная зональность (зерна 4, 5, 8) или секториальная зональность (зерна 2, 6, 7), во внутренних частях остальных цирконов зональность отсутствует. Центральные части некоторых зерен (2, 5, 10, 11) не окатаны, имеют кристаллографические очертания и более темную окраску по своей периферии. В ядерных частях зерен 9 и 11 наблюдаются более светлые участки с кристаллографическими очертаниями (затравки?), содержащие

Таблица 1. Содержание петрогенных оксидов в сиенитах Северного Тимана, мас. %

Table 1. Content of petrogenic oxides in syenites of Northern Timan, wt. %

Компонент Component	Крайний Камешек / Krayny Kameshek					Малый Камешек / Maliy Kameshek				
	141	137	140	144/1	148	155	160	164	165	166
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO_2	61.30	65.40	64.71	62.10	61.61	58.60	58.59	57.04	59.12	57.78
TiO_2	1.03	0.61	0.67	0.76	0.52	0.62	0.95	0.54	0.25	0.25
Al_2O_3	15.49	15.57	15.72	16.09	17.25	18.25	17.89	19.17	19.59	19.52
Fe_2O_3	1.82	1.38	1.49	1.90	1.96	4.28	1.63	3.08	1.11	3.33
FeO	4.83	3.06	3.54	4.03	2.95	1.36	4.56	2.96	2.96	1.24
MnO	0.07	0.10	0.10	0.10	0.13	0.13	0.07	0.14	0.14	0.13
MgO	1.56	0.53	0.49	1.07	0.50	0.83	1.80	1.47	1.12	0.56
CaO	2.33	1.45	1.82	2.28	1.75	1.64	3.10	3.18	1.48	2.14
Na_2O	3.82	5.24	5.39	4.96	6.00	5.80	4.72	5.12	5.38	6.95
K_2O	5.53	5.60	4.95	5.02	6.14	6.70	4.87	5.69	6.44	6.10
P_2O_5	0.28	0.07	0.08	0.22	0.19	0.12	0.25	0.16	0.08	0.09
П.п.п / LOI	1.68	0.76	0.70	1.14	0.81	1.72	1.17	0.99	1.84	1.48
Сумма / Total	99.74	99.77	99.66	99.67	99.81	100.05	99.60	99.54	99.51	99.57

Примечание: 1 — амфибол-биотитовый кварцевый сиенит, 2—5 — биотит-амфиболовые кварцсодержащие щелочные сиениты, 6—10 — сиениты.

Note: 1 — amphibole-biotite quartz syenite, 2—5 — biotite-amphibole quartz-bearing alkaline syenite, 6—10 — syenite.

Рис. 4. Классификационная диаграмма $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ по [12] (а), хондрит-нормализованные спектры РЗЭ (б), спайдерграмма распределения элементов-примесей, нормированных на ОРГ (с) для сиенитов Северного Тимана.

Массивы: 1 — Крайний Камешек, 2 — Малый Камешек. Поля на диаграмме (а): 1 — габбро-нориты, габбро, габбро-диориты; 2 — монзогаббро; 3 — диориты, 4 — монзодиориты; 5 — монзониты; 6 — кварцевые диориты; 7 — кварцевые монзодиориты; 8 — сиениты; 9 — щелочные сиениты; 10 — тоналиты; 11 — гранодиориты; 12 — кварцевые сиениты; 13 — щелочные кварцевые сиениты; 14 — граносиениты; 15 — щелочные граносиениты; 16 — трондjemиты; 17 — адамеллиты; 18 — субщелочные граниты; 19 — плагиограниты; 20 — граниты; 21 — щелочные граниты; 22 — плагиоклазовые лейкограниты; 23 — лейкограниты; 24 — аляскииты; 25 — щелочные аляскииты. Данные по составам хондрита и примитивной мантии взяты в работе [27]

Fig. 4. Classification diagrams for granitoids of the Northern Timan. (a) — $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ [12], (b) — chondrite-normalized REE chart, (c) — spider-diagram for trace elements normalized to ORG.

Numbers refer to plutons: 1 — Krayny Kameshek, 2 — Malyi Kameshek. Numbers refer to fields: 1 — gabbro-norite, gabbro, gabbrodiorite; 2 — monzogabbro; 3 — diorite, 4 — monzodiorite; 5 — monzonite; 6 — quartz diorite; 7 — quartz monzodiorite; 8 — syenite; 9 — alkaline syenite; 10 — tonalite; 11 — granodiorite; 12 — quartz syenite; 13 — alkaline quartz syenite; 14 — granosyenite; 15 — alkaline granosyenite; 16 — trondhjemite; 17 — adamellite; 18 — subalkaline granite; 19 — plagiogranite; 20 — granite; 21 — alkaline granite; 22 — plagioclase leucogranite; 23 — leucogranite; 24 — alaskite; 25 — alkaline alaskite. The data on the compositions of chondrite and primitive mantle are from [27]

черные в катодных лучах включения. Центральные части зерен 3, 4, 6, 7, 8 имеют неправильную форму и неровные границы, в них видна собственная осцилляционная зональность или же они незональны. Для внешних зон роста большинства цирконовых зерен характерна осцилляционная зональность.

Проанализировано 11 зерен, зерно 3 исследовано в центральной и периферической частях (табл. 3). Практически все возраста характеризуются незначительной дискордантностью (D от -8 до 16). Индивидуальные $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраста для когерентной группы из 8 точек образуют интервал 595–626 млн лет, рассчитанный по ним конкордантный возраст составля-

ет 602 ± 5 млн лет (рис. 6). Средневзвешенный $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст, равный 602 ± 9 млн лет (95%, СКВО = 6), устанавливается при расчете по всем 12 определениям. Полученный возраст близок к Rb—Sr и Pb—Pb датировкам и, вероятно, соответствует времени кристаллизации сиенитов массива Крайний Камешек.

Цирконы из нефелинового сиенита массива Малый Камешек (обр. 155) представлены очень мелкими зернами размером 50–100 мкм (Ку — 2–3), бипирамидально-призматическими, светло-буровато-розовыми, мутными, полупрозрачными и непрозрачными, по-видимому, содержащими большое количество мельчайших включений. Грани цирконов шероховатые,

Таблица 2. Содержание элементов-примесей в сиенитах Северного Тимана, г/т

Table 2. Trace element contents in syenites of the Northern Timan, ppm

Массив / Massif	Крайний Камешек / Krayny Kameshek					Малый Камешек / Malyi Kameshek				
Компонент Component	141	144/1	148	137	140	160	165	155	164	166
V	100.44	20.19	12.47	11.8	<2.5	1.88	32.64	<2.5	37.7	14.5
Cr	185.40	15.36	14.13	32.3	30.2	11.31	28.07	33.3	42.6	39.4
Co	23.22	4.22	3.34	3.89	2.79	1.20	5.17	5.31	10.7	5.04
Ni	71.78	7.79	7.07	13.1	14.2	6.39	14.67	17.5	20	16.9
Cu	28.73	6.88	5.83	20.3	25.3	4.07	8.98	19.3	34.7	18.3
Zn	20.70	22.00	24.96	50.5	50.5	21.49	23.03	49.1	91.8	60.2
Ga	6.70	9.96	11.12	24.4	23.6	9.30	11.04	18.8	21.5	21.1
Rb	33.55	78.46	56.37	227	189	30.94	80.26	163	178	202
Sr	291.65	86.01	49.87	69.6	137	20.05	136.10	233	349	253
Y	10.21	16.31	14.75	50.6	44.7	7.15	12.03	28.8	28.7	27.9
Zr	92.01	98.43	112.04	238	315	42.84	94.06	239	316	355
Nb	45.37	42.82	53.04	94.6	111	43.06	55.53	211	170	150
Mo	3.54	0.96	8.51	1.69	2.17	0.75	1.36	1.56	1.04	1
Sn	2.69	5.19	4.92	5.54	4.17	2.03	6.16	2.29	3.05	2.91
Cs	8.76	8.85	4.01	6.62	3.34	1.71	5.72	1.55	4.88	3.68
Ba	827.93	848.04	872.16	728	1110	468.37	983.04	1800	1200	587
La	48.26	49.22	51.65	81.3	69	25.48	51.50	66.2	96.2	90
Ce	79.36	97.64	96.46	155	134	51.80	90.87	125	174	144
Pr	9.96	12.84	11.83	15.8	13.3	7.20	11.17	14.2	16.2	14.5
Nd	38.06	50.29	43.10	56.2	49.1	28.95	40.30	50.5	51.6	43.1
Sm	6.89	10.04	8.03	11.2	8.95	5.57	7.26	7.71	7.48	7.18
Eu	2.17	1.90	1.52	1.52	2.1	1.36	1.81	2.46	1.57	1.03
Gd	6.13	9.37	7.57	9.2	8.06	5.29	6.62	6.04	6.58	5.9
Tb	0.74	1.22	1.04	1.38	1.32	0.70	0.85	0.93	1	0.88
Dy	4.54	7.48	6.81	9.12	8.03	4.39	5.43	5.18	4.75	4.35
Ho	0.85	1.48	1.42	1.68	1.42	0.87	1.10	0.93	1.07	0.98
Er	2.31	4.22	4.34	5.44	4.93	2.50	3.16	2.71	3.16	3.07
Tm	0.32	0.61	0.65	0.75	0.75	0.35	0.47	0.36	0.49	0.41
Yb	1.93	3.74	4.13	4.61	4.67	2.25	2.96	2.67	2.47	2.6
Lu	0.28	0.54	0.60	0.64	0.65	0.35	0.43	0.34	0.45	0.42
Hf	4.38	4.82	5.73	7.52	9.52	3.24	4.79	6.31	8.17	8.84
Ta	5.23	5.52	7.55	7.36	8.73	4.99	6.38	10.6	11.2	10
Pb	3.64	4.31	5.34	8.4	5.46	4.42	6.14	4.23	7.14	11.8
Th	3.46	6.71	5.25	19.4	24	1.75	9.06	9.20	16.4	17.5
U	0.88	1.78	1.60	3.84	4.93	0.55	1.65	2.47	2.49	3.88

Примечание. Обр. 140 и 155 проанализированы во ВСЕГЕИ, остальные — в Институте геологии и геохимии УрО РАН.

Note. Samples 140 and 155 were analyzed at VSEGEI, other samples — at the Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Рис. 5. Катодолюминесцентное изображение цирконов из щелочного сиенита массива Крайний Камешек (обр. 148) с номерами датированных зерен и аналитических кратеров

Fig. 5. Cathodoluminescent images of zircon grains from alkaline syenite of the Krayny Kameshek pluton, sample 148. The figure shows grain numbers and analyzed spots

Таблица 3. Результаты U—Pb изотопных исследований цирконов из сиенитов Северного Тимана

Table 3. Results of U—Pb isotopic studies of zircons from syenites of Northern Timan

Зерно, кратер Grain, crater	206Pb _c , %	Содержания, мкг/г Contents, ppm		²³² Th 238U	Изотопные отношения ±% (1σ) Isotope ratios ±% (1σ)			Rho	Возраст ± 1σ, млн лет Age ± 1σ, Ma		D, %	
		206Pb*	U		Th	206Pb/238U	207Pb/235U		207Pb/206Pb			
		Массив Крайний Камешек, обр. 148 Крайній Камешек massif, s. 148										
8.1	0.07	10	128	51	0.41	0.0937 ± 1.0	0.800 ± 2.2	0.0620 ± 2.0	0.5	577 ± 6	672 ± 42	16
4.1	0.09	45	545	325	0.62	0.0967 ± 0.7	0.815 ± 1.2	0.0611 ± 1.0	0.5	595 ± 4	644 ± 22	8
3.2	0.06	14	172	64	0.39	0.0970 ± 0.8	0.795 ± 2.0	0.0595 ± 1.8	0.4	597 ± 5	583 ± 38	-2
1.1	0.43	64	766	518	0.70	0.0973 ± 0.6	0.824 ± 1.6	0.0614 ± 1.5	0.4	598 ± 4	653 ± 31	9
10.1	н.п.о.	46	552	230	0.43	0.0975 ± 0.6	0.807 ± 1.1	0.0600 ± 0.9	0.6	600 ± 4	604 ± 19	1
2.1	0.06	54	644	419	0.67	0.0976 ± 1.1	0.824 ± 1.4	0.0612 ± 0.9	0.8	600 ± 6	646 ± 19	8
7.1	0.86	13	155	69	0.46	0.0990 ± 0.9	0.804 ± 3.7	0.0589 ± 3.6	0.2	609 ± 5	561 ± 79	-8
11.1	н.п.о.	9	104	44	0.43	0.1008 ± 1.0	0.870 ± 2.3	0.0626 ± 2.1	0.4	619 ± 6	695 ± 45	12
5.1	0.33	37	423	219	0.53	0.1019 ± 3.5	0.841 ± 3.8	0.0598 ± 1.5	0.9	626 ± 21	597 ± 33	-5
3.1	н.п.о.	31	349	211	0.62	0.1024 ± 1.4	0.868 ± 1.8	0.0614 ± 1.2	0.8	629 ± 8	654 ± 25	4
6.1	н.п.о.	27	296	103	0.36	0.1049 ± 1.9	0.879 ± 2.2	0.0608 ± 1.2	0.8	643 ± 11	631 ± 25	-2
9.1	0.20	30	315	157	0.52	0.1093 ± 4.0	0.929 ± 4.3	0.0617 ± 1.5	0.9	668 ± 25	661 ± 33	-1
Массив Малый Камешек, обр. 155 Малý Камешек massif, s. 155												
3.1	0.05	32	405	438	1.12	0.0933 ± 1.7	0.761 ± 2.0	0.0592 ± 1.1	0.8	575 ± 9	573 ± 24	0
7.1	0.36	103	1259	1271	1.04	0.0955 ± 1.3	0.791 ± 1.7	0.0600 ± 1.1	0.8	588 ± 7	604 ± 24	3
4.1	0.10	108	1299	1743	1.39	0.0968 ± 0.6	0.806 ± 0.9	0.0604 ± 0.6	0.6	596 ± 3	616 ± 14	3
11.1	0.05	214	2473	2953	1.23	0.1009 ± 1.3	0.842 ± 1.4	0.0605 ± 0.4	1.0	620 ± 8	621 ± 9	0
12.1	н.п.о.	35	392	273	0.72	0.1040 ± 3.7	0.876 ± 3.8	0.0611 ± 1.1	1.0	638 ± 22	642 ± 23	1
6.1	0.93	35	394	320	0.84	0.1047 ± 1.8	0.891 ± 4.4	0.0617 ± 4.0	0.4	642 ± 11	664 ± 87	3
8.1	н.п.о.	42	347	133	0.39	0.1418 ± 1.1	1.367 ± 1.3	0.0699 ± 0.8	0.8	855 ± 9	925 ± 16	8
1.1	0.06	72	434	597	1.42	0.1930 ± 1.3	2.175 ± 1.4	0.0818 ± 0.7	0.9	1137 ± 13	1239 ± 13	9
9.1	0.59	81	406	276	0.70	0.2328 ± 9.3	2.691 ± 9.5	0.0839 ± 2.1	1.0	1349 ± 113	1288 ± 40	-4
2.1	н.п.о.	35	157	45	0.30	0.2599 ± 0.8	3.351 ± 1.2	0.0935 ± 0.8	0.7	1489 ± 11	1498 ± 15	1
5.1	н.п.о.	138	586	181	0.32	0.2749 ± 0.9	3.634 ± 1.0	0.0959 ± 0.4	0.9	1566 ± 13	1544 ± 8	-1
10.1	н.п.о.	49	202	121	0.62	0.2793 ± 0.8	3.748 ± 1.0	0.0973 ± 0.7	0.7	1588 ± 11	1573 ± 13	-1

Примечание. Ошибка в калибровке стандарта составляет 0.15 %. $^{206}\text{Pb}_c$ и $^{206}\text{Pb}^*$ — обыкновенный и радиогенный свинец, н.п.о. — ниже предела определения (≤ 0.04). Изотопные отношения и содержания ^{206}Pb скорректированы по измеренному ^{204}Pb . D — дискордантность: $D = 100 \times [\text{возраст } (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) / \text{возраст } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$. Rho — коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

Note. Error in the calibration of standard is 0.15%. $^{206}\text{Pb}_c$ and $^{206}\text{Pb}^*$ — common and radiogenic lead, н.п.о. — below the limit of determination (≤ 0.04). Isotopic ratios and ^{206}Pb contents are corrected from measured ^{204}Pb . D — discordance: $D = 100 \times [\text{age } (^{207}\text{Pb} / ^{206}\text{Pb}) / \text{age } (^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}) - 1]$. Rho is the error correlation coefficient of radiogenic $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ versus $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

редко встречаются кристаллы с блестящими гранями. На катодолуминесцентных изображениях (рис. 7) по внутреннему строению выделяется четыре типа зерен: 1) очень темные незональные — зерна 5, 7, 11; 2) зональные с более светлым ядром, в котором иногда видна своя грубая осцилляционная зональность, и очень темной каймой без видимой зональности — зерна 1, 2, 6, 8, 12; 3) зерно с темным ядром без зональности и темной каймой без зональности, разделенными светлой просечкой — зерно 4; 4) более светлые зерна без ядер, с четкой грубой контрастной осцилляционной зональностью, с черными включениями в центральной части зерен или же с более темным ядром с нарушенной зональностью — зерна 3, 9, 10.

Результаты датирования 12 зерен (табл. 3, рис. 8) показывают, что, несмотря на достаточно близкое рас-

Рис. 6. Диаграмма с конкордией для цирконов из щелочного сиенита массива Крайний Камешек (обр. 148). Рассчитанный конкордантный возраст 602 ± 5 млн лет (95 %, $n = 8$, СКВО = 7.6) обозначен жирным эллипсом. Здесь и на следующей диаграмме координаты аналитических точек — центры эллипсов погрешностей (2σ)

Fig. 6. Concordia diagram for zircons from alkaline syenite of the Krayny Kameshek pluton, sample 148. The calculated concordant age of 602 ± 5 Ma (95 %, $n = 8$, MSWD = 7.6) is shown by the bold ellipse. In this and the next diagram, the analysis values are the centers of the error ellipses (2σ)

Рис. 7. Катодолуминесцентное изображение цирконов из нефелинового сиенита массива Малый Камешек (обр. 155) с номерами датированных зерен и аналитических кратеров

Fig. 7. Cathodoluminescent images of zircon grains from nepheline syenite of the Malyy Kameshek pluton, sample 155. The figure shows grain numbers and analyzed spots

Рис. 8. Диаграмма с конкордией для цирконов из нефелинового сиенита массива Малый Камешек (обр. 155). На вставке жирный эллипс соответствует рассчитанному конкордантному возрасту 627 ± 10 млн лет (2σ , $n = 3$, СКВО = 0.098). Внизу — средневзвешенный $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст 598 ± 17 млн лет (95%, $n = 6$, СКВО = 6.7); бары ошибок для 2σ . Анализы, исключенные из расчета среднего возраста, показаны серым

Fig. 8. Concordia diagram for zircons from nepheline syenite of the Malyy Kameshek pluton, sample 155. The calculated concordant age of 627 ± 10 Ma (2σ , $n = 3$, MSWD = 0.098) is shown by the bold ellipse in the insert. Below is the weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age 598 ± 17 Ma (95%, $n = 6$, MSWD = 6.7); error bars for 2σ . Analyses that were excluded from the mean age calculations are grey

положение сиенитовых массивов, цирконы различаются по содержаниям U, Th, по их изотопным отношениям и по возрастам. В половине зерен возрастные значения по изотопным отношениям $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ образуют интервал 642—575 млн лет, средневзвешенный возраст составляет 598 ± 17 млн лет (рис. 8, нижняя часть). Значительная дисперсия индивидуальных возрастов не позволяет рассчитать конкордантный возраст по всей совокупности этих точек. И лишь группируя их можно получить средний конкордантный возраст для зерен 11, 12 и 6 — 627 ± 10 млн лет (рис. 8, врезка). Он незначительно отличается от средневзвешенного $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраста, который и принимается за время кристаллизации сиенитов массива Малый Камешек, поскольку в большей степени сопоставим с возрастом сиенитов массива Крайний Камешек и мыса Большой Румяничный. Цирконы с возрастными больше 900 млн лет, по всей видимости, унаследованы из вмещающих пород при формировании сиенитов. Обращает на себя внимание их корреляция с U—Pb (LA-ICP-MS) возрастными детритовых цирконов из вмещающих неопротерозойских метатерригенных отложений барминской серии [4—6].

Таким образом, Pb—Pb и U—Pb возрастные данные по цирконам из сиенитов Северного Тимана свидетельствуют об их образовании в эдиакарии в возрастном интервале 613—600 млн лет. В это же время происходило формирование других магматических пород, наблюдаемых на Северном Тимане (рис. 1). U—Pb (SIMS) возраст цирконов из оливин-керсутитовых габбро, обнаженных в районе устья р. Румяничной, составляет 614 ± 2 млн лет [23], а из жильных гранитов на мысе Большой Румяничный — 614 ± 11 млн лет [16]. Практически такими же возрастными характеризуются цирконы из субщелочных гранитов массива Большой Камешек — 613 ± 6 млн лет [16], а также из ассоциируемых с ними габбро-долеритов — 617 ± 6 млн лет [23].

Проявления щелочного магматизма в северо-восточном обрамлении Восточно-Европейской платформы могли быть связаны с завершающими этапами распада Родинии при раскрытии океана Япетус в интервале 650—550 млн лет [18, 26], сопровождавшимися плюмовым магматизмом, продукты которого известны также в восточной части Лаврентии (дайки Лонг Рейндж с возрастом 615 ± 2 млн лет [22]) и на скандинавской стороне Балтики (дайки Эггесунд с возрастом 616 ± 3 млн лет [17]). Предполагается, что эти дайки относятся к магматической провинции Центрального Япетуса (CIMP) [20, 28]. Эдиакарские интрузивные породы Северного Тимана могут также принадлежать этой магматической провинции [16]. Их расположение в области позднеэдиакарской пассивной окраины Балтики, тесная ассоциация умеренно-щелочных и щелочных гранитов, сиенитов и щелочных габброидов свидетельствуют об анорогенной природе этих интрузивов и возможной связи с плюмовым магматизмом.

Авторы благодарны Э. Л. Миллер и М. А. Коблу (Стэнфордский университет, США) за содействие в определении возрастов цирконов.

Литература

- Акимов Г. Н. Геохронология докембрия Тимана // Сов. геология. 1980. № 12. С. 71—85.
- Андреичев В. Л. Изотопная геохронология интрузивного магматизма Северного Тимана. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 90 с.
- Андреичев В. Л., Ларионов А. Н. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ датирование единичных кристаллов циркона из магматических пород Северного Тимана // Изотопное датирование геологических процессов: новые методы и результаты. Тезисы докладов I Российской конференции по изотопной геохронологии. М.: ГЕОС, 2000. С. 26—28.
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Герелс Дж. У—Pb-возраст детритовых цирконов из верхнедокембрийских терригенных отложений Северного Тимана. ДАН. 2013. Т. 450. № 5. С. 562—566.
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Хоуриган Дж. К. Результаты U—Pb (LA-ICP-MS) датирования детритовых цирконов из терригенных отложений верхней части докембрийского фундамента Северного Тимана // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2017. Т. 92, вып. 1. С. 10—20.
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Хубанов В. Б., Соболев И. Д. U—Pb (LA-ICP-MS) возраст детритовых цирконов из метаосадочных пород основания верхнедокембрийского разреза Северного Тимана // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2018. Т. 93, вып. 2. С. 14—26.
- Ивенсен Ю. П. Магматизм Тимана и полуострова Канин. М.; Л.: Наука, 1964. 126 с.
- Костюхин М. Н., Степаненко В. И. Байкальский магматизм Канино-Тиманского региона. Л.: Наука, 1987. 232 с.
- Мальков Б. А. Новые данные о возрасте досилурийских интрузивных комплексов Тимана и Канина // Докл. АН СССР. 1966. Т. 170. № 3. С. 669—672.
- Мальков Б. А. Петрология дайковой серии щелочных габброидов Северного Тимана. Л.: Наука, 1972. 128 с.
- Оловянишников В. Г. Геологическое развитие полуострова Канин и Северного Тимана. Сыктывкар: Геопринт, 2004. 80 с.
- Петрография и петрология магматических, метаморфических и метасоматических горных пород / Ред. В. С. Попов, О. А. Богатиков. М.: Логос, 2001. 768 с.
- Скрипниченко В. А. Габбро-сиенитовый комплекс Северного Тимана // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238. № 1. С. 211—214.
- Смирнов М. Ю. К вопросу о возрасте сиенит-гранитоидного комплекса Северного Тимана // Проблемы изучения и освоения природных ресурсов Севера. Апатиты. 1973. С. 51—54.
- Фишман М. В., Андреичев В. Л., Естафьева А. Д. Каталог определений возраста горных пород СССР радиогеологическими методами (северо-восток европейской части СССР, север Урала, Пай-Хой, Новая Земля). Сыктывкар: Ин-т геологии Коми фил. АН СССР, 1981. 181 с. Деп. в ВИНТИ. № 531—82.
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Udoratina O. V., Ronkin Yu. L., Coble M. A., Miller E. L. Granites of the Northern Timan — probable indicators of Neoproterozoic stages of Rodinia break-up // Geodynamics & Tectonophysics. 2020. V. 11. Issue 2. P. 10—28. doi: 10.5800/GT-2020-11-2-0470.
- Bingen B., Demaiffe D., van Breemen O. The 616 Ma old Egersund basaltic dike swarm, SW Norway, and Late Neoproterozoic opening of the Iapetus ocean // Journal of Geology. 1998. V. 106. № 5. P. 565—574. https://doi.org/10.1086/516042.
- Cawood P. A., McCausland P. G. A., Dunning G. R. Opening Iapetus: constraints from the Laurentian margin in Newfoundland // Bull. Geol. Soc. Am. 2001. V. 113. P. 443—453.

19. Coble M. A., Vazquez J., Barth A. P., Wooden J., Burns D., Kylander-Clark A., Jackson S., Vennari C. E. Trace element characterization of MAD-559 zircon reference Material for ion microprobe analysis // *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2018. V. 42. P. 481–497.
20. Ernst R. E., Bell K. Large Igneous Provinces (LIPs) and Carbonatites // *Mineralogy and Petrology*. 2010. V. 98. № 1–4. P. 55–76. <https://doi.org/10.1007/s00710-009-0074-1>.
21. Ireland T. R., Gibson G.M. SHRIMP monazite and zircon geochronology of high-grade metamorphism in New Zealand // *J. Metamorphic Geol.* 1998. V. 16. P. 149–167.
22. Kamo S. L., Gower C.F., Krogh T. E. Birthdate for the Iapetus ocean? A precise U-Pb zircon and baddeleyite age for the Long Range dikes, southeast Labrador // *Geology*. 1989. V. 17. № 7. P. 602–605. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017<0602:BFTLOA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017<0602:BFTLOA>2.3.CO;2).
23. Larionov A. N., Andreichev V. L., Gee D. G. The Vendian alkaline igneous suite of northern Timan: ion microprobe U-Pb zircon ages of gabbros and syenite // *The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica*. Eds. Gee D. G., Pease V. Geol. Soc. London. Mem. 2004. № 30. P. 69–74.
24. Ludwig K. R. SQUID 2 — A User's Manual, rev. 12 Apr, 2009 // *Berkeley Geochronology Center Special Publication*. 2009. № 5. 110 p.
25. Ludwig K. R. Isoplot 3.75, a geochronological toolkit for Excel // *Berkeley Geochronology Center Special Publication*. 2012. № 5. 75 p.
26. Pisarevsky S. A., Murphy J. B., Cawood P. A., Collins A. S. Late Neoproterozoic and Early Cambrian palaeogeography: models and problems // *West Gondwana: Pre-Cenozoic correlations across the South Atlantic region* / Eds. Pankhurst R. J., Trouw R. A. J., Neves Brito B. B., de Wit M.J. Geol. Soc. London. Mem. 2008. № 249. P. 9–31.
27. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Geol. Soc. Spec. Publ.* London. 1989. V. 42. P. 313–345.
28. Youbi N., Ernst R., Söderlund U., Soulaïmani A., Doblas M., Bertrand H., Marzoli A., El Hachimi H., Bensalah M. K., Hafid A., Ikenne M., Kouyaté D., El Bahat A., Mohamed B. A., Madeira J., Mata J., Martins L., Bellieni G., Vêrati C., Mahmoudi A. The Central Iapetus magmatic province (CIMP) large igneous province. Distribution, nature, origin, and environmental impact // *American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Search and Discovery*. 2011. Article #90137.
- Section of North Timan. *Doklady Earth Sciences*, 2013, V. 450, No. 2, pp. 592–596.
5. Andreichev V. L., Soboleva A. A., Hourigan J. K. *Rezultaty U-Pb (LA-ICP-MS) datirovaniya detritovykh tsirkonov iz terrigen-nykh otlozhenij verhnjej chasti dokembrijskogo fundamenta Severnogo Timana* (Results of U-Pb (LA-ICP-MS) dating of detrital zircons from terrigenous sediments of the upper part of the Precambrian basement of the Northern Timan). *Bulletin MOIP, Geology section*, 2017, V. 92, No. 1, pp. 10–20.
6. Andreichev V. L., Soboleva A. A., Khubanov V. B., Sobolev I.D. *U-Pb (LA-ICP-MS) vozrast detritovykh tsirkonov iz metaosadochnykh porod osnovaniya verhnedokembrijskogo razreza Severnogo Timana* (U-Pb (LA-ICP-MS) age of detrital zircons from metasedimentary rocks of the Upper Precambrian basement of the Northern Timan). *Bulletin MOIP, Geology section*, 2018, V. 93, No. 2, pp. 14–26.
7. Ivensen Yu. P. *Magmatizm Timana i poluostrova Kanin* (Magmatism of the Timan and Kanin Peninsula). Moscow–Leningrad: Nauka, 1964, 126 p.
8. Kostyukhin M. N., Stepanenko V. I. *Bajkal'skij magmatizm Kanino-Timanskogo regiona* (Baikalian magmatism of the Kanin–Timan region). Leningrad: Nauka, 1987, 232 p.
9. Mal'kov B. A. *Novye dannye o vozraste dosilurijskikh intruzivnykh kompleksov Timana i Kanina* (New data on the age of the pre-Silurian intrusive complexes of Timan and Kanin). *Transactions of the USSR Academy of Sciences*, 1966, V.170, No. 3, pp. 669–672.
10. Mal'kov B. A. *Petrologiya dajkovoj serii shchelochnykh gabbroidov Severnogo Timana* (Petrology of the dyke series of alkaline gabbroic rocks of the Northern Timan). Leningrad: Nauka, 1972, 128 p.
11. Olovyannishnikov V. G. 2004. *Geologicheskoe razvitie poluostrova Kanin i Severnogo Timana* (Geological development of the Kanin Peninsula and Northern Timan). Syktyvkar: Geoprint, 80 p.
12. *Petrografiya i petrologiya magmaticheskikh, metamorficheskikh i metasomaticheskikh gornykh porod* (Petrography and Petrology of Magmatic, Metamorphic and Metasomatic Rocks). Popov V. S., Bogatkov O. A. (Eds). Moscow: Logos Publishing House, 2001, 768 p.
13. Skripnichenko V. A. *Gabbro-sienitovyj kompleks Severnogo Timana* (Gabbro–syenite complex of the Northern Timan). *Transactions of the USSR Academy of Sciences*, 1978, V. 238, No. 1, pp. 211–214.
14. Smirnov M. Yu. *K voprosu o vozraste sienit-granitoidnogo kompleksa Severnogo Timana* (Age of the syenite-granitoid complex of the Northern Timan). *Problems of study and development of natural resources of the North*. Apatity, 1973, pp. 51–54.
15. Fishman M. V., Andreichev V. L., Estaf'eva A. D. *Katalog opredelenij vozrasta gornykh porod SSSR radiologicheskimi metodami (severo-vostok evropejskoj chasti SSSR, sever Urala, Paj-Hoj, Novaya Zemlya)* (Catalog of age determinations of the USSR rocks by radiological methods (the northeastern European part of the USSR, northern areas of the Urals, Pai-Khoi, Novaya Zemlya)). Available from VINITI, Institute of Geology, Komi Branch, USSR Academy of Sciences, Syktyvkar, No. 531–82, 181 p.
16. Andreichev V. L., Soboleva A. A., Udoratina O. V., Ronkin Yu. L., Coble M. A., Miller E. L. Granites of the Northern Timan — probable indicators of Neoproterozoic stages of Rodinia breakup. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2020, V. 11, Issue 2, pp. 10–28. doi: 10.5800/GT-2020-11-2-0470.
17. Bingen B., Demaiffe D., van Breemen O. The 616 Ma old Egersund basaltic dike swarm, SW Norway, and Late

Neoproterozoic opening of the Iapetus ocean. *Journal of Geology*, 1998, V. 106, No. 5, pp. 565–574. <https://doi.org/10.1086/516042>.

18. Cawood P. A., McCausland P. G. A., Dunning G. R. Opening Iapetus: constraints from the Laurentian margin in Newfoundland. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 2001, V. 113, pp. 443–453.

19. Coble M. A., Vazquez J., Barth A. P., Wooden J., Burns D., Kylander-Clark A., Jackson S., Vennari C. E. Trace element characterization of MAD-559 zircon reference Material for ion microprobe analysis. *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2018, V. 42, pp. 481–497.

20. Ernst R. E., Bell K. Large Igneous Provinces (LIPs) and Carbonatites. *Mineralogy and Petrology*, 2010, V. 98, No. 1–4, pp. 55–76. <https://doi.org/10.1007/s00710-009-0074-1>.

21. Ireland T. R., Gibson G.M. SHRIMP monazite and zircon geochronology of high-grade metamorphism in New Zealand. *J. Metamorphic Geol.*, 1998, V. 16, pp. 149–167.

22. Kamo S. L., Gower C. F., Krogh T.E. Birthdate for the Iapetus ocean? A precise U-Pb zircon and baddeleyite age for the Long Range dikes, southeast Labrador. *Geology*, 1989, V. 17, № 7, pp. 602–605. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017<0602:BFTLOA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017<0602:BFTLOA>2.3.CO;2).

23. Larionov A. N., Andreichev V. L., Gee D. G. The Vendian alkaline igneous suite of northern Timan: ion microprobe U-Pb zircon ages of gabbros and syenite. *The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica*. Eds. Gee D. G., Pease V. *Geol. Soc. London. Mem.*, 2004, No. 30, pp. 69–74.

24. Ludwig K. R. SQUID 2 — A User's Manual, rev. 12 Apr, 2009. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2009, No. 5, 110 p.

25. Ludwig K. R. Isoplot 3.75, a geochronological toolkit for Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2012, No. 5, 75 p.

26. Pisarevsky S. A., Murphy J. B., Cawood P. A., Collins A. S. Late Neoproterozoic and Early Cambrian palaeogeography: models and problems. *West Gondwana: Pre-Cenozoic correlations across the South Atlantic region*. Eds. Pankhurst R.J., Trouw R. A. J., Neves Brito B. B., de Wit M.J. *Geol. Soc. London. Mem.*, 2008, No. 249, pp. 9–31.

27. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc. Spec. Publ. London*, 1989. V. 42, pp. 313–345.

28. Youbi N., Ernst R., Söderlund U., Soulaïmani A., Doblas M., Bertrand H., Marzoli A., El Hachimi H., Bensalah M. K., Hafid A., Ikenne M., Kouyaté D., El Bahat A., Mohamed B.A., Madeira J., Mata J., Martins L., Bellieni G., Vêrati C., Mahmoudi A. The Central Iapetus magmatic province (CIMP) large igneous province. Distribution, nature, origin, and environmental impact. *American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Search and Discovery*, 2011, article #90137.

Поступила в редакцию / Received 20.05.2021