

Е. А. Ниткина, Т. Б. Баянова

Изотопно-геохронологическое изучение пород Ингозерского массива (Кольский полуостров)

Проведено изотопно-геохронологическое изучение биотитовых, амфибол-биотитовых и биотит-амфиболовых гнейсов, а также секущих плагиигранитов и пегматоидных жил Ингозерского массива, расположенного в северо-восточной части Беломорского подвижного пояса и сложенного гнейсами и гранитоидами архея. Петрохимические и геохимические характеристики изученных пород сходны с породами тоналит-трондьемит-гранодиоритовых (ТТГ) комплексов, установленных на других докембрийских щитах. Для исследованных гнейсов Ингозерского массива характерны высокие содержания Na, Ca и низкие K. На диаграмме Ab-An-Or точки химических анализов гнейсов ложатся в поля тоналитов и трондьемитов. Высокое содержание легких редкоземельных элементов и отсутствие Eu-аномалии свидетельствует о происхождении пород из обогащенных источников без существенной роли фракционной кристаллизации. Изотопное U-Pb-датирование единичных зерен циркона из биотитовых гнейсов Ингозерского массива (ID-TIMS) определило наиболее древний возраст ($3\,149 \pm 46$ млн лет), который, вероятно, отвечает времени образования магматического протолита гнейсов Ингозерского массива. Согласно модельным Sm-Nd-возрастам образование исходных для изученных пород расплавов происходило в интервале 3,1–2,8 млрд лет. Изотопным U-Pb-методом (ID-TIMS) по циркону определено время проявления процессов метаморфизма в гнейсах: биотитовых – $2\,697 \pm 9$ млн лет; амфибол-биотитовых – $2\,725 \pm 2$ и $2\,667 \pm 7$; биотит-амфиболовых – $2\,727 \pm 5$ млн лет. Возраст более поздних гранитоидов, секущих деформированные гнейсы, составляет: плагиигранитов – $2\,615 \pm 8$ млн лет; пегматоидных жил в гнейсах – $2\,549 \pm 30$ млн лет.

Ключевые слова: архейские комплексы ТТГ, распределение REE в гнейсах, изотопное U-Pb-датирование, геохимические особенности ТТГ.

Введение

Ингозерский массив расположен в северо-восточной части Беломорского подвижного пояса (рис. 1) и сложен преимущественно гнейсами и гранитоидами разного состава [1–5]. На геологической карте Кольского региона он выделяется в самостоятельный блок и рассматривается как древнейшая интрузия гранодиоритов, тоналитов и плагиигранитов, окруженная гнейсами комплекса основания [6]. Комплексы основания архея на региональных картах являются геологически значимыми структурами и выделяются как гнейсовые комплексы тоналит-трондьемит-гранодиоритов (ТТГ) [3; 7; 6]. Sm-Nd-модельные датировки гнейсов Ингозерского массива находятся в интервале 3,1–2,8 млрд лет и отражают мезоархейский возраст отделения расплава от мантийного источника [2]. Изотопно-геохронологические U-Pb-исследования для пород данного массива ранее не проводились.

Для Кольского полуострова получено достаточно много датировок древнее 3,0 млрд лет по детритовым цирконам [8–10], но не было обнаружено магматических пород, отвечающих этому возрасту. Геологические предположения о древнейшем возрасте пород Ингозерского массива [6] и первые данные о мезоархейском возрасте (3,1 млрд лет) [10] циркона из биотитовых гнейсов делают изотопно-геохронологическое изучение пород Ингозерского комплекса актуальным и требуют его продолжения.

Изотопно-геохронологическое и изотопно-геохимическое изучение гнейсов и гранитоидов ТТГ комплекса Ингозерского массива, а также определение U-Pb- и Sm-Nd-возраста пород проведено с целью установления временной последовательности геологических процессов, проявленных в данном массиве.

Геологическая характеристика объекта

В Ингозерском массиве установлены биотитовые, биотит-амфиболовые, амфибол-биотитовые гнейсы, амфиболиты, гранитогнейсы, гранодиориты и пегматиты [1; 4–7].

Разнообразные по составу гнейсы, являющиеся метаморфизованными и рассланцованными останцами первичных ТТГ-пород, имеют во всех обнажениях Ингозерского комплекса схожие азимуты и углы падения [2]. Дайки основного состава, метаморфизованные и рассланцованные совместно с толщами гнейсов, переработаны в полевошпатовые амфиболиты и прорваны телами крупнозернистых гранитов и пегматитов. Светло-серые среднезернистые массивные граниты образуют тела небольшой мощности, жилы, прорывающие гнейсы и содержат порфирировидные включения пегматоидного материала, при этом граниты прорываются жилами пегматитов различной мощности. Также наблюдаются кварцевые жилы, прорывающие гнейсы и пегматиты.

Последовательность эндогенных процессов Ингозерского массива [2] включает следующие этапы: 1) образование пород, исходных для биотитовых гранитогнейсов; 2) внедрение даек основных пород,

впоследствии превращенных в полевошпатовые амфиболиты; 3) деформация и рассланцевание пород; 4) внедрение тел гранитов и послынная микроклинизация биотитовых гнейсов; 5) внедрение крупных тел пегматитов (гнейсы сохраняются в виде неразвернутых ксенолитов); 6) образование пегматитовых и гранитных жил небольшой мощности; 7) внедрение кварцевых жил.

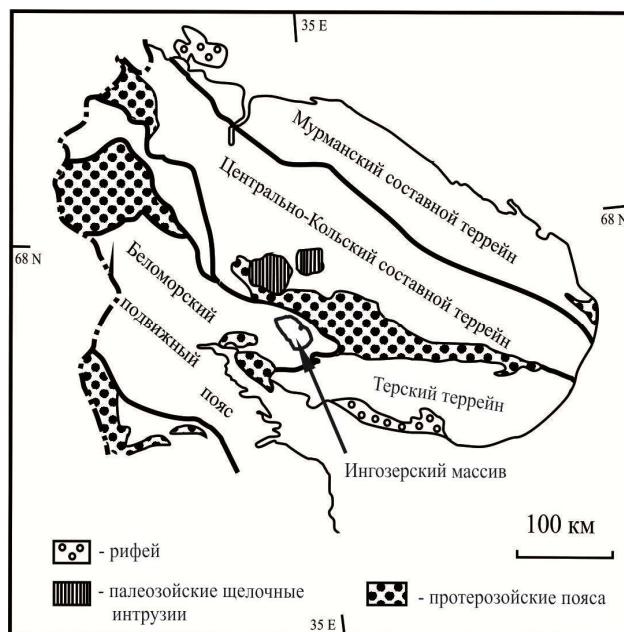


Рис. 1. Схематическая карта Кольского полуострова [11] с изменениями авторов
 Fig. 1. Geological scheme of the Kola Peninsula [11] with the authors' changes

Материалы и методы

Из комплекса ТТГ Ингозерского массива для изотопного U-Pb-датирования были отобраны пробы: биотитовые гнейсы (проба Н-10-01); амфибол-биотитовые гнейсы (проба Н-10-07); биотит-амфиболовые гнейсы (проба Н-10-08). Изотопное U-Pb-датирование плагиогранитов (проба Н-10-06) и пегматоидных жил в гнейсах (проба Н-10-10) было проведено по зернам циркона и титанита.

Геохронологическое U-Pb-датирование циркона проводилось в лаборатории геохронологии и геохимии изотопов ГИ КНЦ РАН методом изотопного разбавления (ID-TIMS) как с использованием трассера ^{205}Pb для датирования единичных зерен, так и с использованием трассера ^{208}Pb для навесок циркона. Химическое разложение циркона для изотопного прецизионного U-Pb-датирования проводилось в лаборатории геохронологии и геохимии изотопов по методике Т. Е. Кроу [12]. Изотопные измерения проводились на масс-спектрометре Finnigan MAT-262 (RPQ) в одноленточном режиме с использованием смешанного трассера $^{208}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ и силикагеля. Расчет координат точек и параметров изохрон проводился на основе работ К. Р. Людвиг [13; 14]; использовались принятые в работах Р. Х. Стейгера, Е. Ягера константы распада [15].

Распределение редкоземельных элементов в породах ТТГ комплекса Ингозерского массива было изучено с использованием данных, полученных в лаборатории изотопно-аналитических методов ИГМ СО РАН.

Результаты и обсуждение

Петрография и геохимия пород, отобранных для U-Pb-датирования

Биотитовые, амфибол-биотитовые и биотит-амфиболовые гнейсы сложены как кварц + плагиоклаз + биотит + микроклин ± амфибол; акцессорными для них являются циркон, кальцит, цоизит, эпидот; вторичным минералом является серицит (рис. 2, a, b, c). Вторичные изменения минералов отражают процессы наложенного метаморфизма амфиболитовой фации. Плагиограниты имеют следующий состав: кварц + плагиоклаз + биотит + микроклин ± амфибол; акцессорными минералами являются гранат, циркон, цоизит, титанит, вторичным минералом – серицит (рис. 2, d, e). Состав пегматитов: кварц ± плагиоклаз ± микроклин; вторичный минерал – серицит (рис. 2, f).

Химический состав пород представлен в табл. 1. При реконструкции первичной природы гнейсов по А. А. Предовскому [16] все изученные образцы попали в поле магматических пород. Для исследованных гнейсов Ингозерского массива характерны высокие содержания Na, Ca и низкие K. На диаграмме Ab-An-Or [17] точки химических анализов гнейсов ложатся в поля тоналитов и трондьемитов (рис. 3). По составу гнейсы

характеризуются высокими содержаниями легких редкоземельных элементов (La, Ce, Pr) с крутым падением кривой распределения REE (от La до Dy) и последующим выполаживанием до Lu при низком содержании тяжелых REE (рис. 4). Высокое содержание легких редкоземельных элементов и отсутствие Eu-аномалии свидетельствуют о происхождении пород из обогащенных источников без существенной роли фракционной кристаллизации. При этом распределение редкоземельных элементов схоже с таковым для пород комплексов ТТГ, известных на других докембрийских щитах [18].

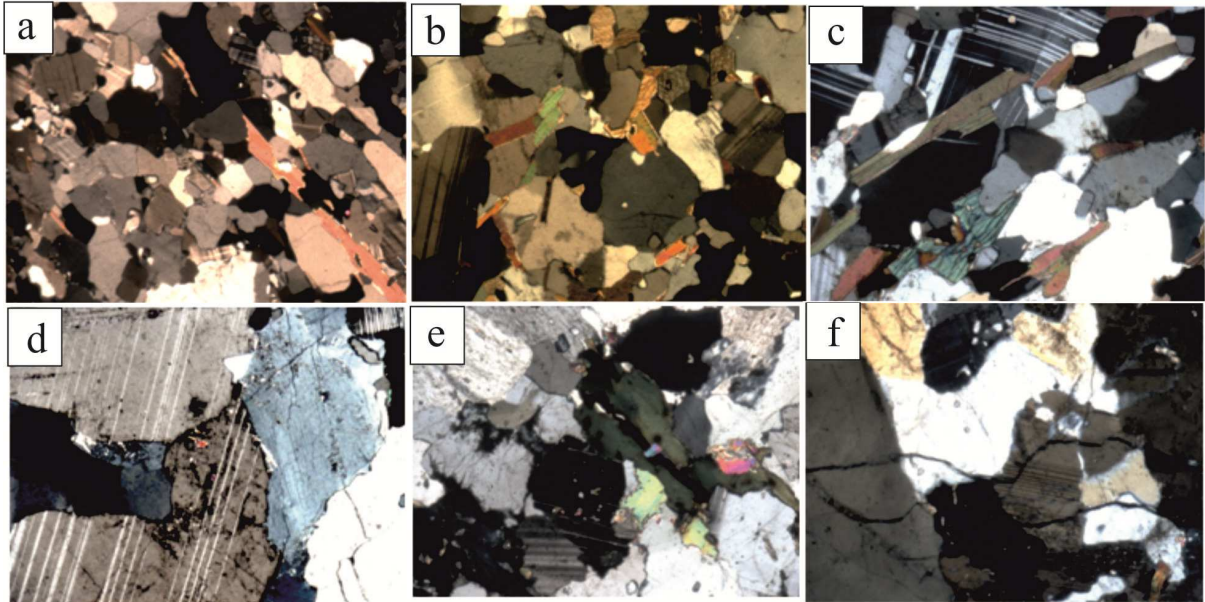


Рис. 2. Фотографии шлифов пород, отобранных для датирования (увеличение 25):
 а – биотитовый гнейс; б – биотит-амфиболовый гнейс; в – амфибол-биотитовый гнейс;
 д – плагиогранит; е – гранит; ф – пегматит

Fig. 2. Thin sections' photo of the samples (magnification 25): a – biotite gneisses; b – biotite-amphibole gneisses; c – amphibol-biotite gneisses; d – plagiogranite; e – granite; f – pegmatite

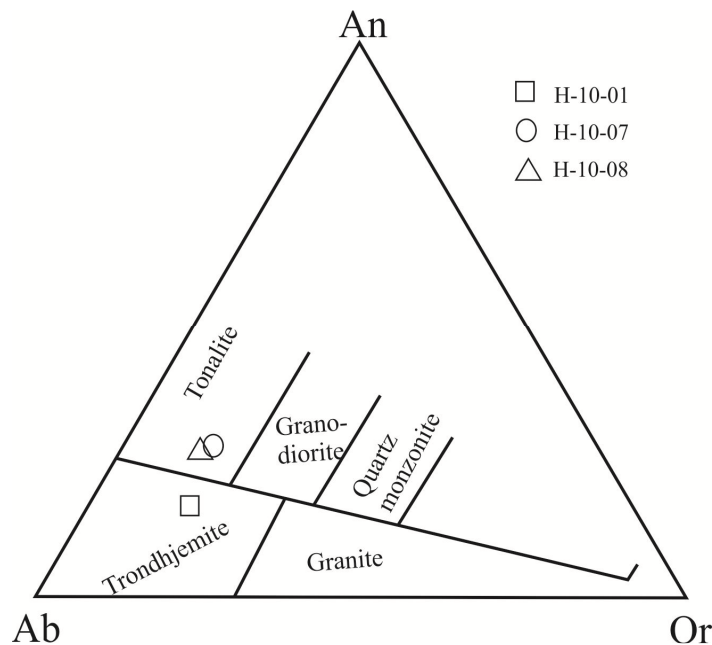


Рис. 3. Классификационная диаграмма Ab-An-Or [17] для гнейсов: биотитовых (проба Н-10-01), амфибол-биотитовых (проба Н-10-07) и биотитовых-амфиболовых (проба Н-10-08) комплекса ТТГ Ингозерского массива

Fig. 3. Ab-An-Or diagram [17] for the sample H-10-01 of biotite gneisses, the sample H-10-07 of amphibol-biotite gneisses, and the sample H10-08 of biotite-amphibole gneisses of the Ingozero massive TTG complex

Таблица 1. Химический состав гнейсов Ингозерского массива
Table 1. Chemical composition of the Ingozero massive gneisses

Оксид	H-10-01	H-10-07	H-10-08
SiO ₂	71,12	67,81	66,55
TiO ₂	0,26	0,49	0,47
Al ₂ O ₃	14,22	13,90	13,85
Fe ₂ O ₃	0,22	0,11	1,09
FeO	2,94	4,77	4,40
MnO	0,037	0,075	0,059
MgO	0,65	1,69	2,00
CaO	2,46	3,95	4,29
Na ₂ O	5,20	4,13	4,26
K ₂ O	1,70	1,37	1,32
La	18,90	11,37	30,17
Ce	34,89	27,22	53,86
Pr	3,98	3,28	6,22
Nd	12,83	12,36	20,66
Sm	1,98	2,34	3,06
Eu	0,46	0,76	0,77
Gd	1,27	2,43	2,62
Tb	0,17	0,37	0,34
Dy	0,71	1,92	1,41
Ho	0,13	0,37	0,25
Er	0,31	0,88	0,68
Tm	0,05	0,13	0,09
Yb	0,30	0,88	0,56
Lu	0,04	0,13	0,08

Характеристики циркона и изотопный U-Pb-возраст

Для пробы H-10-01 из биотитового гнейса по трем фракциям единичных цирконов ранее был установлен возраст $3\,149 \pm 46$ млн лет [10]. Он интерпретируется как наиболее древний возраст магматического протолита гнейсов Ингозерского комплекса.

Также из этой пробы был отобран циркон для U-Pb-датирования методом ID-TIMS. Выделенный из породы циркон представлен темно-коричневыми прозрачными призматическими и короткопризматическими слабо-трещиноватыми кристаллами. Для датирования циркон был разделен по размерным фракциям: $<0,075$ мм – точка 1 на диаграмме с конкордией; $>0,15$ мм – точка 2; $0,1-0,15$ мм – точка 3; $0,075-0,1$ мм – точка 4. Верхнее пересечение дискордии, построенной по четырем фигуративным точкам, с конкордией имеет значение $2\,697 \pm 9$ млн лет, СКВО = 1,8 (табл. 2, 3; рис. 5, а). Повышенное содержание урана (до 828 ppm) и низкие отношения Th/U (рассчитанные по отношениям $^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$) в цирконе (0,11–0,15), скорее, характерны для магматического циркона из гранитов, чем из трондьемитов, к которым относится данная проба [19]. Следовательно, возраст $2\,697 \pm 9$ млн лет интерпретируется как возраст расщепления и метаморфизма пород ТТГ, повлекшего за собой переработку их в биотитовые гнейсы. Вероятно, данный метаморфизм связан с внедрением тел гранитоидов.

Циркон, выделенный из пробы амфибол-биотитовых гнейсов (H-10-07), представлен темно- и светло-коричневыми прозрачными слабо-трещиноватыми коротко- и длиннопризматическими кристаллами. Для датирования цирконы были разделены по морфологии с учетом соотношения граней призм и дипирамид и коэффициента удлинения кристаллов. Для одной из фракций циркона была использована методика двустадийного растворения (табл. 2, 3), что позволило выделить наименее нарушенную часть циркона. Именно для этой фракции (точка 1) был получен конкордантный возраст $2\,667 \pm 7$ млн лет, СКВО = 1,2. По другим четырем фракциям построена дискордия с верхним пересечением в $2\,725 \pm 2$ млн лет, СКВО = 0,061 (табл. 2, 3; рис. 5, б). Аналитические данные для фракции циркона, находящейся на конкордии, отличаются низким отношением Th/U (0,06), поэтому полученный по ней возраст $2\,667 \pm 7$, близкий в пределах ошибки к возрасту циркона в пробе биотитовых гнейсов, также интерпретируется нами как возраст метаморфизма пород ТТГ, в результате которого они были преобразованы в амфибол-биотитовые гнейсы. Возраст $2\,725 \pm 2$ млн лет, возможно, отражает второй этап внедрения тоналитов или этап метаморфизма, связанный с внедрением даек основных пород.

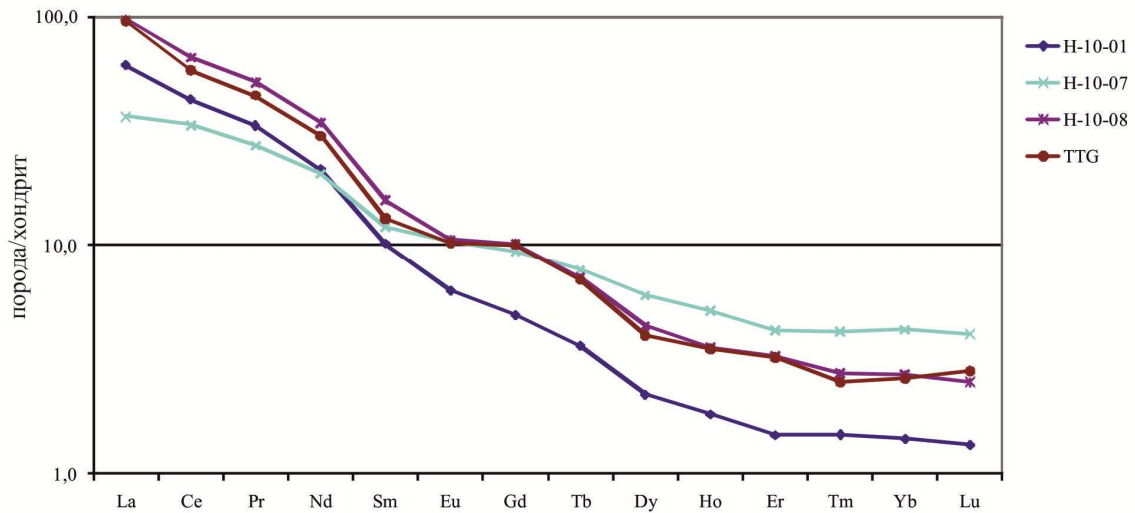


Рис. 4. Распределение редкоземельных элементов (РЗЭ), нормированное к хондриту [20], для биотитовых (H-10-01), амфибол-биотитовых (H-10-07) и биотит-амфиболовых (H-10-08) гнейсов комплекса ТТГ Ингозерского массива (анализы выполнены в ИГМ СО РАН)
 Fig. 4. Chondrite normalized REE distribution [20] for the sample H-10-01 of biotite gneisses, the sample H-10-07 of amphibol-biotite gneisses, and the sample H10-08 of biotite-amphibole gneisses of the Ingozero massive TTG complex (chemical analysis by IGM SB RAS)

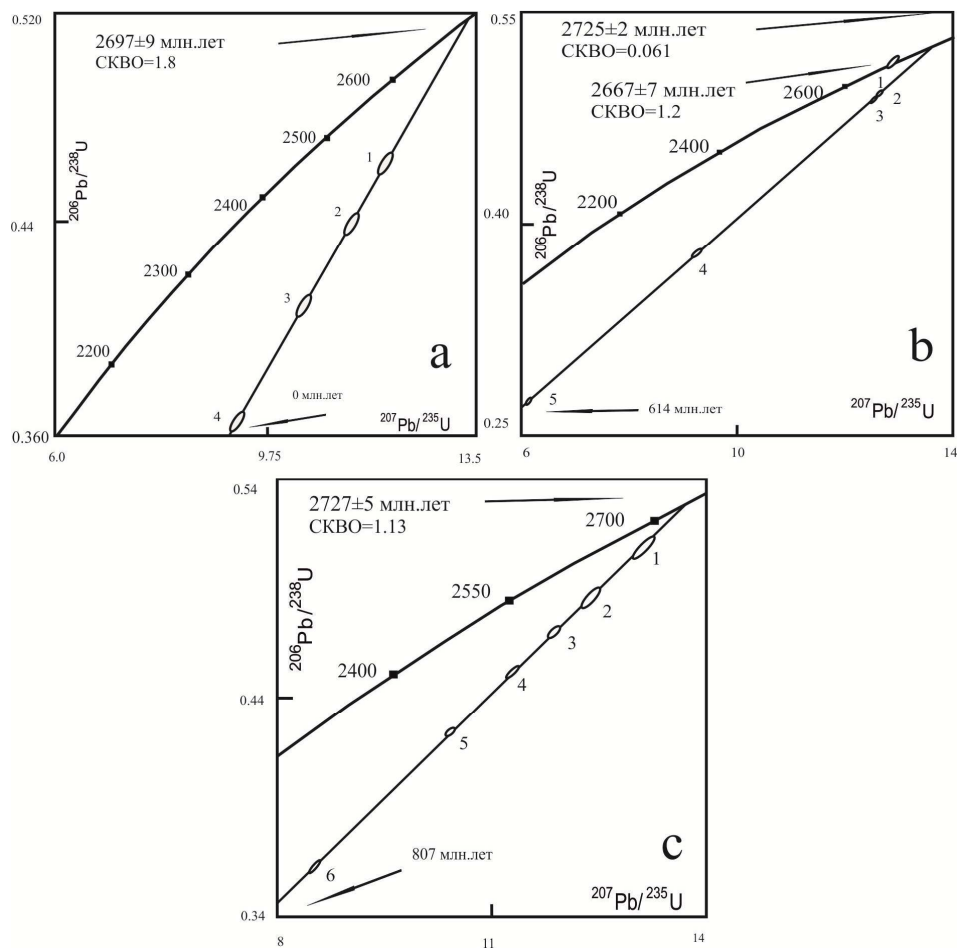


Рис. 5. Изотопная диаграмма U-Pb с конкордией для циркона из проб гнейсов: *a* – биотитового (H-10-01); *b* – амфибол-биотитового (H-10-07); *c* – биотит-амфиболового (H-10-08)
 Fig. 5. Concordia diagram for the sample H-10-01 of biotite gneisses (*a*), H-10-07 of amphibol-biotite gneisses (*b*) and H10-08 biotite-amphibole gneisses (*c*)

Таблица 2. Изотопные U-Pb-данные по единичным зернам с использованием трассера ^{205}Pb для циркона из гнейсов Ингозерского массива
 Table 2. Isotope U-Pb single zircon data with ^{205}Pb -tracer for zircon from the Ingozero massive gneisses

№ п/п	Навеска, мг	Концентрация, ppm		Изотопное отношение*						Возраст, млн лет**			Дискордантность, %
		Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 2\sigma$			
H-10-07													
2	0,063	72,24	132,67	2 202,2	$0,491 \pm 0,001$	$12,576 \pm 0,030$	$0,1859 \pm 0,0001$	$2 574 \pm 6$	$2 648 \pm 6$	$2 706 \pm 2$	4,9		
3	0,090	50,86	99,21	2 848,4	$0,488 \pm 0,002$	$12,498 \pm 0,041$	$0,1848 \pm 0,0002$	$2 563 \pm 8$	$2 638 \pm 9$	$2 696 \pm 2$	4,9		
4	0,084	61,15	145,36	579,9	$0,378 \pm 0,002$	$9,180 \pm 0,074$	$0,1762 \pm 0,0009$	$2 066 \pm 11$	$2 356 \pm 19$	$2 617 \pm 14$	21,1		
H-10-08													
3	0,0788	214,72	78,95	354,1	$0,470 \pm 0,002$	$11,867 \pm 0,071$	$0,1831 \pm 0,0007$	$2 484 \pm 11$	$2 594 \pm 15$	$2 681 \pm 10$	7,3		
4	0,0300	160,23	331,14	1 345,1	$0,452 \pm 0,002$	$11,286 \pm 0,065$	$0,1812 \pm 0,0005$	$2 403 \pm 12$	$2 547 \pm 15$	$2 664 \pm 7$	9,8		
5	0,0157	285,26	629,85	1 129,9	$0,424 \pm 0,001$	$10,412 \pm 0,053$	$0,1763 \pm 0,0006$	$2 279 \pm 8$	$2 463 \pm 13$	$2 619 \pm 9$	13,0		
6	0,0137	193,81	449,45	1 012,9	$0,363 \pm 0,002$	$8,506 \pm 0,062$	$0,1699 \pm 0,0006$	$1 997 \pm 12$	$2 287 \pm 17$	$2 556 \pm 8$	21,9		

Примечания.*Все отношения скорректированы на холостое загрязнение 1 пг для Pb и 10 пг для U и масс-дискриминацию $0,12 \pm 0,04$ %.

**Коррекция на примесь обыкновенного свинца определена на возраст по модели [21].

Таблица 3. Изотопные U-Pb-данные для циркона из гнейсов Ингозерского массива
 Table 3. Isotope U-Pb data for zircons from the Ingozero massive gneisses

№ п/п	Навеска, мг	Содержание, ppm		Изотопный состав свинца ¹			Изотопные отношения и возраст, млн лет ²			Rho ³
		Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
H-10-01										
1	0,5	112,3	228,8	2 427	5,2943	29,2260	11,7632	0,46401	2 690	0,87
2	0,7	385,5	827,7	7 759	5,3717	24,6380	11,2165	0,44070	2 695	0,90
3	0,7	308,9	707,0	4 507	5,3774	19,3060	10,3353	0,40904	2 680	0,89
4	0,4	215,1	550,5	2 640	5,3395	18,9080	9,1753	0,36432	2 680	0,91
H-10-07										
1	0,3	237,0	446,0	6 492	5,4606	61,8460	12,8503	0,51422	2 665	0,93
5	0,3	135,2	470,6	1 459	5,9225	22,6140	6,0202	0,27257	2 458	0,81
H-10-08										
1	0,3	73,3	129,2	725	4,9011	14,2990	13,1091	0,50759	2 720	0,88
2	0,2	66,2	120,4	622	4,8854	12,3480	12,3851	0,48518	2 700	0,96

Примечания.¹Все отношения скорректированы на холостое загрязнение 0,1 нг по Pb и 0,04 нг по U и масс-дискриминацию $0,10 \pm 0,04$ %.

²Коррекция на примесь обыкновенного свинца произведена на возраст по модели [21].

³Rho – коэффициент корреляции по осям.

Циркон из пробы биотит-амфиболовых гнейсов Н-10-08 представлен призматическими трещиноватыми и прозрачными кристаллами, варьирующими по цвету от коричневых до бледно-розовых. Для U-Pb-датирования было отобрано шесть фракций циркона, разделенных по цвету, удлинению и прозрачности зерен. По шести фигуративным точкам построена дискордия, которая имеет верхнее пересечение с конкордией 2727 ± 5 млн лет, СКВО = 1,13 (табл. 2, 3; рис. 5, с). Полученный возраст, идентичный в пределах ошибки возрасту 2725 ± 2 млн лет, полученному для амфибол-биотитовых гнейсов, может отвечать как следующему этапу кристаллизации пород ТТГ, исходных для биотит-амфиболовых гнейсов, так и метаморфизму, связанному с внедрением основных даек.

По результатам изотопного U-Pb-датирования, проведенного для различных пород Ингозерского массива, установлен наиболее древний возраст 3149 ± 46 млн лет, полученный для единичных зерен циркона из биотитовых гнейсов. Вероятно, это наиболее ранняя стадия магматической кристаллизации тоналитов.

Изотопные модельные Sm-Nd-возрасты (T_{DM}), определенные для ТТГ гнейсов Ингозерского массива (табл. 4), составляют: проба биотитового гнейса Н-10-01 – 2820 млн лет; проба амфибол-биотитового гнейса Н-10-07 – 3019 млн лет; проба биотит-амфиболового гнейса Н-10-08 – 2936 млн лет. Модельные датировки, полученные для гнейсов Ингозерского комплекса ранее [2], показывают возрасты в интервале 3,1–2,9 млрд лет, т. е. образование исходных для протолита гнейсов расплавов происходило в течение 3,1–2,8 млрд лет.

Таблица 4. Изотопные Sm-Nd-данные для гнейсов комплекса ТТГ Ингозерского массива
Table 4. Isotope Sm-Nd data for gneisses of the TTG Ingozero massive

Номер образца	Порода	Содержание, ppm		Изотопное отношение		Модельный возраст $T(DM)$, млн лет
		Sm	Nd	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	
Н-10-01	Вт-гнейс	2,138	13,794	0,093697	0,510913	2828
Н-10-07	Аmf-Вт-гнейс	2,927	13,281	0,133200	0,511548	3019
Н-10-08	Вт-Аmf-гнейс	3,767	22,316	0,102033	0,510988	2936
21 K02	Вт-гнейс*	1,492	8,468	0,106513	0,510972	2950
T20 K02	Вт-гнейс*	1,509	8,502	0,107323	0,510900	3081
1 K02A	Вт-гнейс*	2,177	11,355	0,115892	0,511190	2893
2 K02	Вт-Аmf-гнейс *	2,537	15,502	0,098926	0,510875	2881

Примечание. *Данные взяты из работы [2].

Более молодые возрасты, полученные по цирконам и составляющие для проб Н-10-01 биотитовых гнейсов 2697 ± 9 млн лет, Н-10-07 амфибол-биотитовых гнейсов – 2725 ± 2 и 2667 ± 7 млн лет и Н-10-08 биотит-амфиболовых гнейсов – 2727 ± 5 млн лет, скорее всего, отвечают времени проявления метаморфических событий, связанных с деформацией и расланцеванием пород. Полученные в ходе предварительного U-Pb-датирования циркона и титанита возрасты гранитов равны 2615 ± 8 млн лет, послонных жил пегматоидного материала в гнейсах – 2549 ± 30 млн лет.

Заключение

Изученные гнейсы Ингозерского массива по петрохимическим характеристикам отвечают тоналитам и трондьемитам, геохимические характеристики распределения редкоземельных элементов схожи с породами комплексов ТТГ, известных на древнейших щитах мира.

По результатам изотопного датирования установлена последовательность геологических процессов Ингозерского массива:

- 1) 3149 ± 46 млн лет – образование магматического протолита биотитовых гнейсов;
- 2) 2727 ± 5 – 2725 ± 2 млн лет – внедрение тоналитов или метаморфизм и деформация пород, связанные с внедрением даек основных пород;
- 3) 2697 ± 9 – 2667 ± 7 млн лет – расланцевание, метаморфизм, деформация пород, происходившие одновременно с внедрением гранитоидных тел;
- 4) 2615 ± 8 млн лет – образование жил гранитов;
- 5) 2549 ± 30 млн лет – образование жил пегматитов.

Благодарности

Работа подготовлена при поддержке программы Президиума РАН № 19 "Фундаментальные проблемы геолого-геофизического изучения литосферных процессов".

Библиографический список

1. Батиева И. Д., Бельков И. В. Гранитоидные формации Кольского полуострова // Очерки по петрологии, минералогии и металлогении гранитов Кольского полуострова. Л. : Наука, 1968. С. 5–143.
2. Козлов Н. Е., Сорохтин Н. О., Глазнев В. Н., Козлова Н. Е., Иванов А. А. [и др.]. Геология архея Балтийского щита : монография. СПб. : Наука, 2006. 329 с.

3. Митрофанов Ф. П. Современные проблемы и некоторые решения докембрийской геологии кратонов // Литосфера. 2001. № 1. С. 5–14.
4. Загородный В. Г., Радченко А. Т. Принципы и главные черты тектонического районирования северо-восточной части Балтийского щита // Тектоника и глубинное строение северо-восточной части Балтийского щита : [сб. статей] / отв. ред. В. Г. Загородный, М. Т. Козлов. Апатиты : Кол. фил. АН СССР, 1978. С. 3–12.
5. Бельков И. В., Загородный В. Г., Предевский А. А. [и др.]. Опыт разработки сводной схемы стратиграфии докембрия Кольского полуострова // Стратиграфическое расчленение и корреляция докембрия северо-восточной части Балтийского щита : [сб. статей] / отв. ред. В. Г. Загородный. Л. : Наука. 1971. С. 141–150.
6. Докембрийская тектоника северо-восточной части Балтийского щита : Объяснительная записка к тектонической карте северо-восточной части Балтийского щита м-ба 1:500 000 / отв. редактор Ф. П. Митрофанов. Апатиты : Кол. фил. АН СССР. 1992. 112 с.
7. Объяснительная записка к геологической карте северо-восточной части Балтийского щита масштаба 1:500 000 / ред. Ф. П. Митрофанов. Апатиты : КНЦ РАН, 1994. 95 с.
8. Вревский А. Б., Богомолов Е. С., Зингер Т. Ф., Сергеев С. А. Полихронность источников и изотопный возраст вулканогенного комплекса (Арваренчская свита) Имандра-Варзугской структуры, Кольский полуостров // Доклады Академии наук. 2010. Т. 431, № 3. С. 377–381.
9. Кожевников В. Н., Скублов С. Г., Марин Ю. Б., Медведев П. В., Сыстра Ю. [и др.]. Хадей-архейские детритовые цирконы из ятулийских кварцитов и конгломератов Карельского кратона // Доклады Академии наук. 2010. Т. 431, № 1. С. 85–90.
10. Bayanova T. B., Kunakkuzin E. L., Serov P. A., Fedotov D. A., Borisenko E.S. [et al.]. Precise U-Pb (ID-TIMS) and SHRIMP-II ages on single zircon and Nd-Sr signatures from Achaean TTG and high aluminum gneisses on the Fennoscandian Shield // 32nd Nordic Geological Winter Meeting. Helsinki, Finland, 13–15 January 2016. Abs. Spec. P. 172.
11. Балаганский В. В. Главные этапы тектонического развития северо-востока Балтийского щита в палеопротерозое : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук : 25.00.01. СПб., 2002. 32 с.
12. Krogh T. E. A low-contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determination // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1973. V. 37. P. 485–494.
13. Ludwig K. R. PBDAT, a computer program for processing Pb-U-Th data, version 1.20 // United geological survey open-file report. 1991. P. 88–542.
14. Ludwig K. R. IsoplotEx, a geochronological Toolkit for Microsoft Excel, version 2.05 // Berkeley Geochronology Center special publication 1999. N 1a. 49 p.
15. Steiger R. H., Jager E. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of constants in geo- and cosmochronology // *Earth and Planetary Science Letters*. 1977. V. 36, N 3. P. 359–362.
16. Предевский А. А. Реконструкция условий седиментогенеза и вулканизма раннего докембрия. Л. : Наука, 1980. 152 с.
17. O'Connor J. T. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios // *US Geological Survey Professional Paper*. 1965. P. 0525-B; P. B79-B84.
18. Moyen J.-F., Martin H. Forty years of TTG research // *Lithosphere*. 2012. V. 148. P. 312–336. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.010>.
19. Каулина Т. В. Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах / под ред. Ф. П. Митрофанова. Апатиты : КНЦ РАН, 2010. 144 с.
20. Boynton W. V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies / Chapter 3 in *Rare Earth Element Geochemistry // Developments in Geochemistry*. V. 2 / ed. P. Henderson. Elsevier : Amsterdam, 1985. P. 115–1522.
21. Stacey J. S., Kramers J. O. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth and Planetary Science Letters*. 1975. V. 26, Iss. 2. P. 207–221. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90088-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90088-6).

References

1. Batieva I. D., Belkov I. V. Granitoidnye formatsii Kolskogo poluostrova [Kola Peninsula granitoid units] // *Ocherki po petrologii, mineralogii i metallogenii granitov Kolskogo poluostrova*. L. : Nauka, 1968. P. 5–143.
2. Kozlov N. E., Sorohtin N. O., Glaznev V. N., Kozlova N. E., Ivanov A. A. [i dr.]. *Geologiya arheya Baltijskogo schita [Archaean geology of the Baltic Shield] : monografiya*. SPb. : Nauka, 2006. 329 p.
3. Mitrofanov F. P. *Sovremennye problemy i nekotorye resheniya dokembriyskoy geologii kratonov [Cratons Precambrian geology actual questions and some answers] // Litosfera*. 2001. N 1. P. 5–14.
4. Zagorodnyi V. G., Radchenko A. T. Printsipy i glavnye cherty tektonicheskogo rayonirovaniya severo-vostochnoy chasti Baltijskogo schita [Principles and main features of the tectonic zoning of the Baltic Shield north-eastern part] // *Tektonika i glubinnoe stroenie severo-vostochnoy chasti Baltijskogo schita : [sb. statey]* / отв. ред. В. Г. Загородный, М. Т. Козлов. Апатиты : Кол. фил. АН СССР, 1978. P. 3–12.

5. Belkov I. V., Zagorodnyi V. G., Predovskiy A. A. [i dr.]. Opyt razrabotki svodnoy shemy stratigrafii dokembriya Kolskogo poluoostrova [Stratigraphic dismemberment and Precambrian correlation of the Baltic Shield north-eastern part] // Stratigraficheskoe raschlenenie i korrelyatsiya dokembriya severo-vostochnoy chasti Baltiyskogo schita : [sb. statey] / otv. red. V. G. Zagorodnyiy. L. : Nauka. 1971. P. 141–150.
6. Dokembriyskaya tektonika severo-vostochnoy chasti Baltiyskogo schita : Ob'yasnitelnaya zapiska k tektonicheskoy karte severo-vostochnoy chasti Baltiyskogo schita m-ba 1 : 500 000 [The north-eastern part Baltic Shield Precambrian tectonic (The tectonic map Explanatory note of the N-E Baltic Shield 1: 500000)] / otv. redaktor F. P. Mitrofanov. Apatity : Kol. fil. AN SSSR. 1992. 112 p.
7. Ob'yasnitelnaya zapiska k geologicheskoy karte severo-vostochnoy chasti Baltiyskogo schita masshtaba 1 : 500 000 [Geological map explanatory note of the north-eastern part of the Baltic shield, scale 1 : 500000] / red. F. P. Mitrofanov. Apatity : KNTs RAN, 1994. 95 p.
8. Vrevskiy A. B., Bogomolov E. S., Zinger T. F., Sergeev S. A. Polihronnost istochnikov i izotopnyi vozrast vulkanogenogo kompleksa (Arvarenskaya svita) Imandra-Varzugskoy struktury, Kolskiy poluostrov [Sources polychronism and isotope age of the volcanogenic complex (Arvarenskaya suite) within the Imandra-Varzugskaya structure, the Kola Peninsula] // Doklady Akademii nauk. 2010. V. 431, N 3. P. 377–381.
9. Kozhevnikov V. N., Skublov S. G., Marin Yu. B., Medvedev P. V., Systra Yu. [i dr.]. Hadei-arheyskie detritovye tsirkony iz yatuliyskikh kvartsitov i konglomeratov Karelskogo kratona [Hadei-Archean detrital zircons from Yatulian quartzites and conglomerates of the Karelian Craton] // Doklady Akademii nauk. 2010. V. 431, N 1. P. 85–90.
10. Bayanova T. B., Kunakkuzin E. L., Serov P. A., Fedotov D. A., Borisenko E.S. [et al.]. Precise U-Pb (ID-TIMS) and SHRIMP-II ages on single zircon and Nd-Sr signatures from Achaean TTG and high aluminum gneisses on the Fennoscandian Shield // 32nd Nordic Geological Winter Meeting. Helsinki, Finland, 13–15 January 2016. Abs. Spec. P. 172.
11. Balaganskiy V. V. Glavnye etapy tektonicheskogo razvitiya severo-vostoka Baltiyskogo schita v paleoproterozoe [The main Paleoproterozoic tectonic development stages of the north-eastern part of the Baltic Shield] : avtoref. dis. ... d-ra geol.-mineral. nauk : 25.00.01. SPb., 2002. 32 p.
12. Krogh T. E. A low-contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determination // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1973. V. 37. P. 485–494.
13. Ludwig K. R. PBDAT, a computer program for processing Pb-U-Th data, version 1.20 // United geological survey open-file report. 1991. P. 88–542.
14. Ludwig K. R. IsoplotEx, a geochronological Toolkit for Microsoft Excel, version 2.05 // Berkeley Geochronology Center special publication 1999. N 1a. 49 p.
15. Steiger R. H., Jager E. Subcommission on geochronology: Convention on the use of constants in geo- and cosmochronology // Earth and Planetary Science Letters. 1977. V. 36, N 3. P. 359–362.
16. Predovskiy A. A. Rekonstruktsiya usloviy sedimentogeneza i vulkanizma rannego dokembriya [Reconstruction of the conditions of the early Precambrian sedimentogenesis and volcanism]. L. : Nauka, 1980. 152 p.
17. O'Connor J. T. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios // US Geological Survey Professional Paper. 1965. P. 0525-B; P. B79-B84.
18. Moyaen J.-F., Martin H. Forty years of TTG research // Lithosphere. 2012. V. 148. P. 312–336. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.010>.
19. Kaulina T. V. Obrazovanie i preobrazovanie tsirkona v polimetamorficheskikh kompleksah [Formation and transformation of zircon in polymetamorphic complexes] / pod red. F. P. Mitrofanova. Apatity : KNTs RAN, 2010. 144 p.
20. Boynton W. V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies / Chapter 3 in Rare Earth Element Geochemistry // Developments in Geochemistry. V. 2 / ed. P. Henderson. Elsevier : Amsterdam, 1985. P. 115–1522.
21. Stacey J. S., Kramers J. O. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // Earth and Planetary Science Letters. 1975. V. 26, Iss. 2. P. 207–221. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90088-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90088-6).

Сведения об авторах

Ниткина Елена Анатольевна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, канд. геол.-минерал. наук, науч. сотрудник; e-mail: nitkina@rambler.ru

Nitkina E. A. – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Cand. of Geol. & Miner. Sci., Researcher; e-mail: nitkina@rambler.ru

Баянова Тамара Борисовна – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Геологический институт КНЦ РАН, д-р геол.-минерал. наук; e-mail: bayanova@geoksc.apatity.ru

Bayanova T. B. – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Geological Institute KSC RAS, Dr of Geol. & Miner. Sci.; e-mail: bayanova@geoksc.apatity.ru

E. A. Nitkina, T. B. Bayanova

Isotope-geochronological study of Ingozero massive (the Kola Peninsula)

The Ingozero massive composed of Archean gneisses and granitoids is situated in the north-eastern part of the Belomorian mobile belt. The Ingozero massive petrochemical and geochemical characteristics are similar to those of tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) complexes established on other Archean shields. High concentrations of Na, Ca, and low of K characterize the gneisses of the Ingozero massif and the samples points lie on the tonalite and trondhjemite fields on the Ab-An-Or diagram. The high content of light rare earth elements and the absence of Eu anomalies indicate the origin of rocks from enriched sources without the essential role of fractional crystallization. The isotope U-Pb single zircon grains dating of the biotite gneisses yielded the oldest age for the Ingozero gneisses magmatic protolith at $3\,149 \pm 46$ Ma. Model Sm-Nd ages have shown the formation of the gneisses protolith initial melt occurred at 3.1–2.8 Ga. The ages of metamorphic processes were determined by isotope U-Pb dating (ID TIMS): biotite gneisses – $2\,697 \pm 9$ Ma; amphibole-biotite gneisses – $2\,725 \pm 2$ and $2\,667 \pm 7$ Ma; and biotite-amphibole gneisses – $2\,727 \pm 5$ Ma. The ages for granitoids, which cut the deformed gneisses are $2\,615 \pm 8$ Ma and $2\,549 \pm 30$ Ma for plagiogranites and pegmatoid veins in gneisses respectively.

Key words: Archaeans TTG complexes, gneisses REE distribution, isotope U-Pb dating, TTG geochemical features.