

Древнейшие породы фундамента и внеземное вещество Центрально-Кольского и Мурманского мегаблоков (С-В части Фенноскандинавского щита, Арктический регион): новые U-Pb и LA-ICP-MS данные

Баянова Т. Б.¹, Дрогобужская С. В.³, Кунаккузин Е. Л.¹, Стешенко Е. Н.¹, Докукина К. А.²,
Huber M. A.⁴, Данилина В. Г.⁵, Данилин К. П.⁵, Елизаров Д. В.¹

¹ Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, t.bayanova@ksc.ru

² Геологический институт Российской академии наук, Москва, ksdokukina@gmail.com

³ Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И. В. Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, s.drogobuzhskaia@ksc.ru

⁴ Marie Curie-Skłodowska University, Lublin, grossular107umcs@gmail.com

⁵ Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр РАН», Апатиты, k.danilin@ksc.ru

Аннотация. Статья посвящена новым изотопным (U-Pb, SHRIMP, ICP-MS, Sm-Nd, Rb-Sr) и геохимическим (Isr, εNd, TDM, REE, Ir) данным для континентальной коры эоархей-палеоархейского возраста Центрально-Кольского и Мурманского мегаблоков, расположенных в С-В части Фенноскандинавского щита, Арктический регион. На основе большого банка изотопно-геохимических данных для серых гнейсов, ТТГ и амфиболитов были выделены интервалы формирования пород фундамента в 3.4 и 2.9 млрд лет и изучены ICP-MS методами концентрации Ir индикатора вклада внеземного вещества (метеоритов) для пород двух мегаблоков.

Ключевые слова: U-Pb, LA-ICP-MS, SHRIMP, Ir аномалия, породы фундамента, Арктика, Фенноскандинавский щит.

The oldest rock types of the foundation and extraterrestrial material of the Central-Kola and Murmansk megablocks (northwestern part of the Fennoscandian Shield of the Arctic region): new U-Pb and LA-ICP-MS data

Bayanova T. B.¹, Drogobuzhskaya S. V.³, Kunakkuzin E. L.¹, Steshenko E. N.¹, Dokukina K. A.²,
Huber M. A.⁴, Danilina V. G.⁵, Danilin K. P.⁵, Elizarov D. V.¹

¹ Geological Institute, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, t.bayanova@ksc.ru

² Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, ksdokukina@gmail.com

³ Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, s.drogobuzhskaia@ksc.ru

⁴ Marie Curie-Skłodowska University, Lublin, grossular107umcs@gmail.com

⁵ Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, k.danilin@ksc.ru

Abstract. The article is dedicated to new isotopic (U-Pb, SHRIMP, ICP-MS, Sm-Nd, Rb-Sr) and geochemical (Isr, εNd, TDM, REE, Ir) data for the continental crust of Eoarchean-Paleoarchean age in the Central Kola and Murmansk megablocks, located in the northwestern part of the Fennoscandian Arctic Shield. Based on a large database of isotope-geochemical data for gray gneisses, TTG and amphibolites, formation intervals of the basement rocks were identified at 3.4 and 2.9 Ga ago. The ICP-MS method was used to study Ir concentrations as an indicator of extraterrestrial material (meteorite) contribution in rocks from two megablocks.

Keywords: U-Pb, LA-ICP-MS, SHRIMP, Ir anomaly, basement rocks, Arctic, Fennoscandian Shield.

Реликты древнейших пород ТТГ и серых гнейсов хадей-палеоархейского возраста (4.0–3.6 млрд лет) известны на всех континентах мира (Bleeker, 2003; Moyen et al., 2012; Arndt, 2023 и др.).

В пределах С-В части Балтийского или Фенноскандинавского щита Арктического региона геологическое изучение, а также U-Pb и SHRIMP датирование циркона из серых гнейсов было

Таблица 1. Геохронологические данные для архейских пород северо-восточной части Фенноскандинавского щита
Table 1. Geochronological data for Archean rocks of the northeastern part of the Fennoscandian Shield

Местоположение	Порода	Метод	Возраст, млн лет	Ссылка
Выг-ручей, Водлозерский блок	Тоналиты	U-Pb TIMS	3138 ± 63	Лобач-Жученко и др., 1993
	Лейкосомы трондьемитовых мигматитов		3210 ± 12	
Лай-ручей, Водлозерский блок	Тоналиты		3166 ± 14	
Водлозерский блок	Гнейсы	SHRIMP II	3151 ± 18	Чекулаев и др., 2013
	Тоналиты		2850 ± 74	
			2767 ± 23	
	Гнейсы		2967 ± 7	Сергеев и др., 2007
	Гнейсы		3240 ± 14	
	Гнейсы		3153 ± 5.4	
Центрально-Кольский блок, район	Тоналитовые гнейсы	SHRIMP II	3236 ± 17	Мысцова и др., 2015
	Гранат-биотитовые гнейсы		2909 ± 9 – 2732 ± 13	
	Силлиманит-гранат-биотитовые гнейсы		2860 ± 10 – 2636 ± 9	
	Силлиманит-гранат-биотитовые гнейсы		3202 ± 7	
	Силлиманит-гранат-биотитовые гнейсы		3341 ± 10	
Воче-Ламбина, Центрально-Кольский блок	Силлиманит-гранат-биотитовые гнейсы	SHRIMP II	3461 ± 5	Морозова и др., 2012
	Тоналитовые гнейсы		3158.2 ± 8.2	

начато в прошлом веке – Е. Бибиковой, С. Лобач-Жученко, С. Сергеевым, В. Глебовицким, Ф. Митрофановым и многими другими, суммированные результаты изложены в большой книге (Van Kranendonk et al., 2019) и представлены в табл. 1.

В 2012 г. были начаты полевые работы в Центрально-Кольском и в 2017 г. в Мурманском мегаблоках. Изученные объекты представлены на рис. 1.

Изучение серых гнейсов Центрально-Кольского мегаблока было инициировано академиком РАН Митрофановым Ф. П. в 2012 г. в связи со строительством новых дорожных развязок в районе г. Мурманска и появлением новых обнажений – дорожных выемок. Около памятника «Защитникам Советского Заполярья в годы Великой Отечественной войны» (г. Мурманск) была отобрана большая представительная проба высокоглинозёмистых серых гнейсов для U-Pb изучения по аксессуарным минералам времени процессов магматизма и метаморфизма пород фундамента. На изотопное U-Pb датирование были вручную отобраны единичные зёрна цирконов (рис. 2 а), к которым была применена методика дробления зерен, изотопные результаты представлены в (рис. 2 б, табл. 2). U-Pb методом по единичным цирконам измерен возраст 2775 ± 15 млн лет, СКВО = 1.5, который интерпретируется как время регионального метаморфизма амфиболитовой фации (высокие концентрации U и Pb). Координаты одной точки на U-Pb диаграмме с конкордией отражает возраст в 3.16 млрд лет – который интерпретируется как время формирования изверженного протолита серых гнейсов.

Цирконы, в которых были обнаружены реликтовые ядерные части были продатированы SHRIMP-II методом (ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург) в центре изотопных исследований (рис. 2 б, табл. 3).

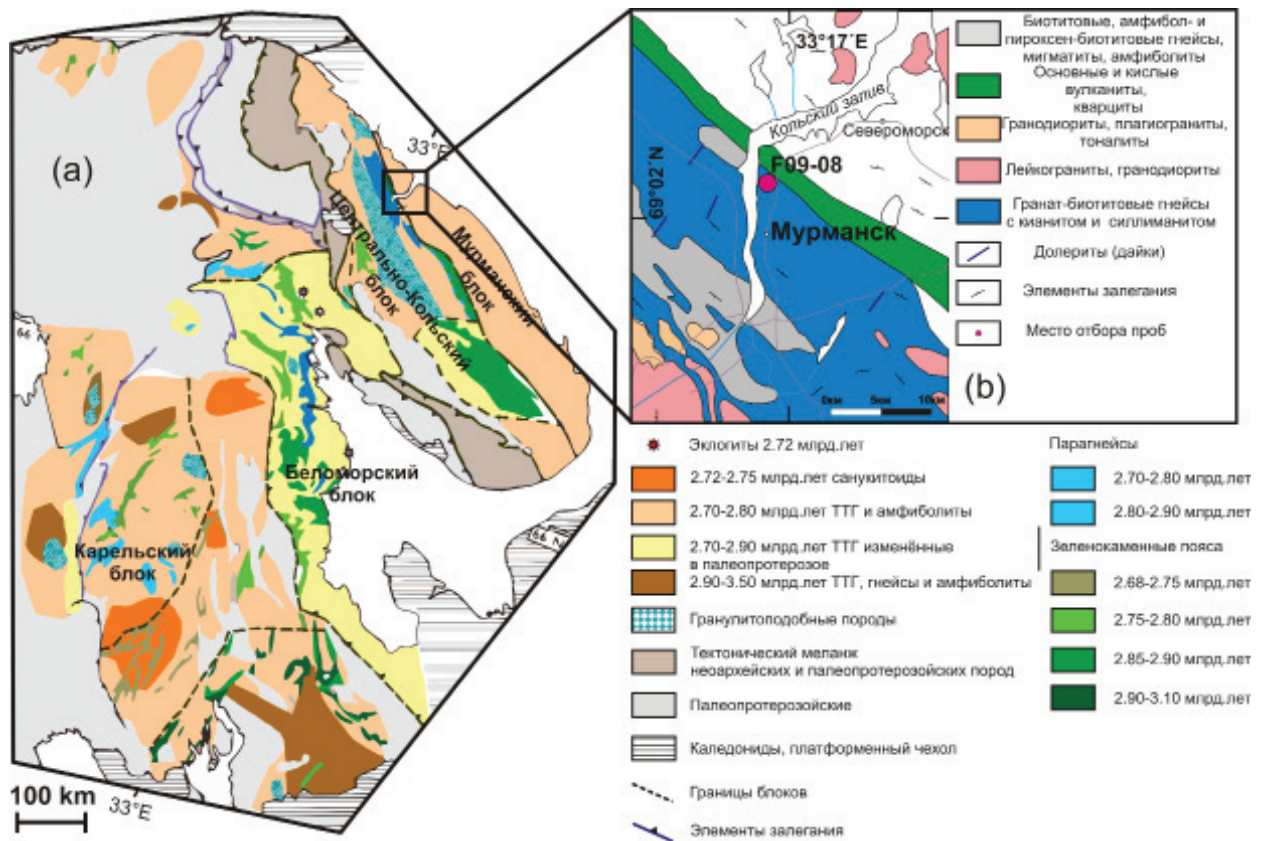


Рис. 1. Обобщенная геологическая карта архея Фенноскандии (а) по данным (Holttä et al., 2012) и схематическая геологическая карта района г. Мурманск (б)

Fig. 1. Generalized geological map of the Archean of Fennoscandia (a) based on data from (Holttä et al., 2012) and a schematic geological map of the Murmansk area (b)

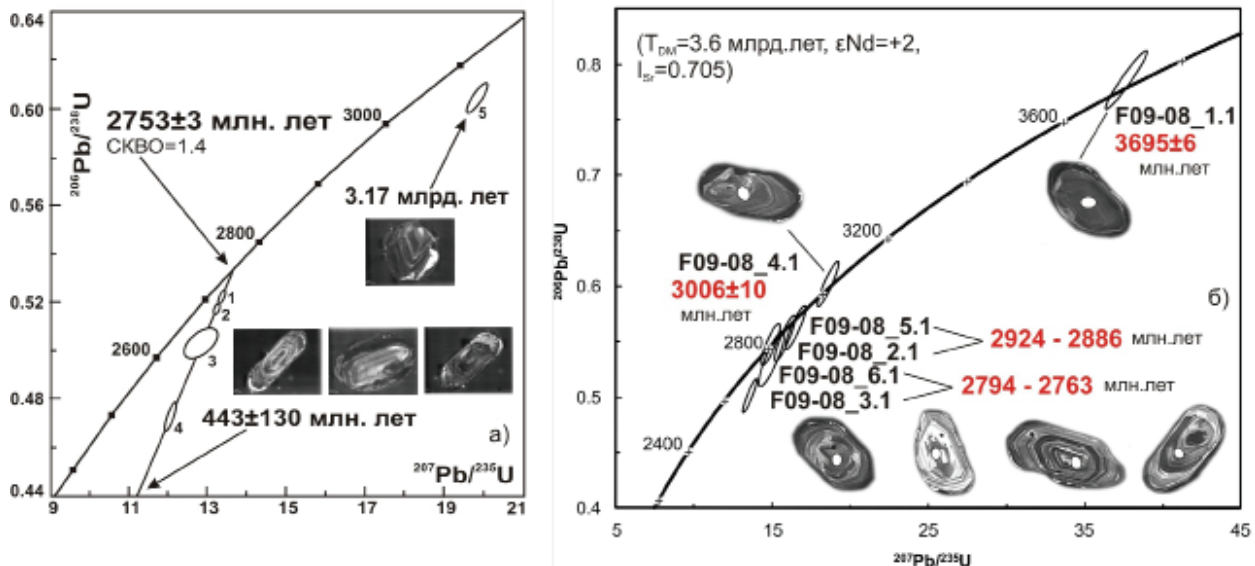


Рис. 2. Изотопные U-Pb диаграммы с конкордией для цирконов из гнейсов Центрально-Кольского блока (а) ID TIMS данные; (б) SHRIMP данные

Fig. 2. Isotope U-Pb concordia diagrams for zircons of the Central Kola Block (a) ID TIMS data and (b) SHRIMP data

Таблица 2. Изотопные U-Pb данные для циркона из гнейсов Центрально-Кольского блока (проба F-09-08)

Table 2. U-Pb isotopic data for zircon from the gneisses of the Central Kola Block (sample F-09-08)

Проба №	Навеска мг	Содержание, ppm		Изотопный состав свинца ¹			Изотопные отношения и возраст млн лет ²			Rho
		Pb	U	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁷ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁸ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	
1	0.10	570.5	853.5	377.3	4.4960	4.6981	13.6639	0.520509	2746	0.90
2	0.40	73.4	122.4	1569.7	5.0300	7.3525	13.6052	0.517448	2752	0.96
3	0.20	105.6	62.5	39.4	2.0155	0.9683	13.1366	0.502440	2739	0.59
4	0.20	30.9	55.2	898.6	4.9505	6.5013	12.2840	0.472568	2729	0.95
5	0.20	139.6	170.5	1115.2	3.8733	3.3616	20.6889	0.604176	3174	0.97

Примечание. ¹ Все отношения скорректированы на холостое загрязнение 0.08 нг для Pb и 0.04 нг для U и масс-дискриминацию 0.12 ± 0.04 ‰.

² Коррекция на примесь обыкновенного свинца определена на возраст по модели Стейси и Крамерса (Stacey, Kramers, 1975).

Методика U-Pb изотопного датирования акцессорных минералов приведена в работе (Баянова, 2004).

Таблица 3. Изотопные SHRIMP данные для циркона из гнейсов Центрально-Кольского блока (проба F-09-08) (данные ВСЕГЕИ, аналитик Ларионов А.)

Table 3. Isotopic SHRIMP data for zircon from the gneisses of the Central Kola Block (sample F-09-08) (data from VSEGEI, analyst Larionov A.)

Точка	% ²⁰⁶ Pb _c	ppm U	ppm Th	ppm ²⁰⁶ Pb*	²³² Th/ ²³⁸ U	(²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U) Age	(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb) Age	% Dis-cordant	(²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb*)	± %	(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb*)	± %	(²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U)	± %	(²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U)	± %	err corr
F09-08_6.1	--	232	298	100.0	1.32	2622 ± 27	2794 ± 9	+8	1.99	1.2	0.1961	0.52	13.6	1.3	0.502	1.2	0.92
F09-08_7.1	0.05	141	91	66.3	0.67	2815 ± 32	2803 ± 14	-1	1.83	1.4	0.1971	0.85	14.9	1.7	0.548	1.4	0.86
F09-08_3.1	0.06	44	34	20.4	0.80	2763 ± 43	2850 ± 18	+4	1.87	1.9	0.2029	1.10	15.0	2.2	0.535	1.9	0.87
F09-08_2.1	--	126	100	60.0	0.82	2839 ± 35	2886 ± 13	+2	1.81	1.5	0.2075	0.78	15.8	1.7	0.553	1.5	0.89
F09-08_5.1	--	125	157	60.6	1.30	2878 ± 33	2924 ± 12	+2	1.78	1.4	0.2125	0.71	16.5	1.6	0.563	1.4	0.89
F09-08_4.1	--	135	119	69.8	0.91	3039 ± 34	3006 ± 10	-1	1.66	1.4	0.2235	0.60	18.6	1.5	0.602	1.4	0.92
F09-08_1.1	0.04	281	108	189.5	0.40	3740 ± 39	3695 ± 6	-2	1.27	1.4	0.3473	0.39	37.7	1.4	0.786	1.4	0.96

Примечание. Методика SHRIMP-II исследований представлена в работе (Larionov et al., 2004).

Изотопные данные по циркону (SHRIMP-II) отразили зоархейский возраст равный 3.7 млрд лет для ядерных зон циркона, выделенного из серых гнейсов Центрально-Кольского мегаблока (рис. 2 а, табл. 3). В пределах Фенноскандинавского щита на территории Финляндии в ядрах циркона, выделенного из ТТГ гнейсов гранулитовой фации метаморфизма (гнейсы Siurua) был получен возраст 3.73 млрд лет (Nordsim). Все суммированные возрастные изотопные SHRIMP (рис. 3 а) и Sm-Nd данные для пород Финляндии (рис. 3 б) были опубликованы в работах (Hölttä, 2012; Huhma, 2016).

Изотопные (Sm-Nd и Rb-Sr) и геохимические (REE, ЭПГ, Ag, Au, Cu и Ni) данные для внеземного вещества

Породы с признаками внеземных (импактных) событий впервые были обнаружены в пределах Центрально-Кольского мегаблока массива Ярва-Варака (в Мончегорском рудном узле), где были изучены гранофировые породы и продатированы U-Pb методом цирконы с импактным событием в 2.5 млрд лет (Nerovich et al., 2023). Комплексное изучение пород фундамента было осно-

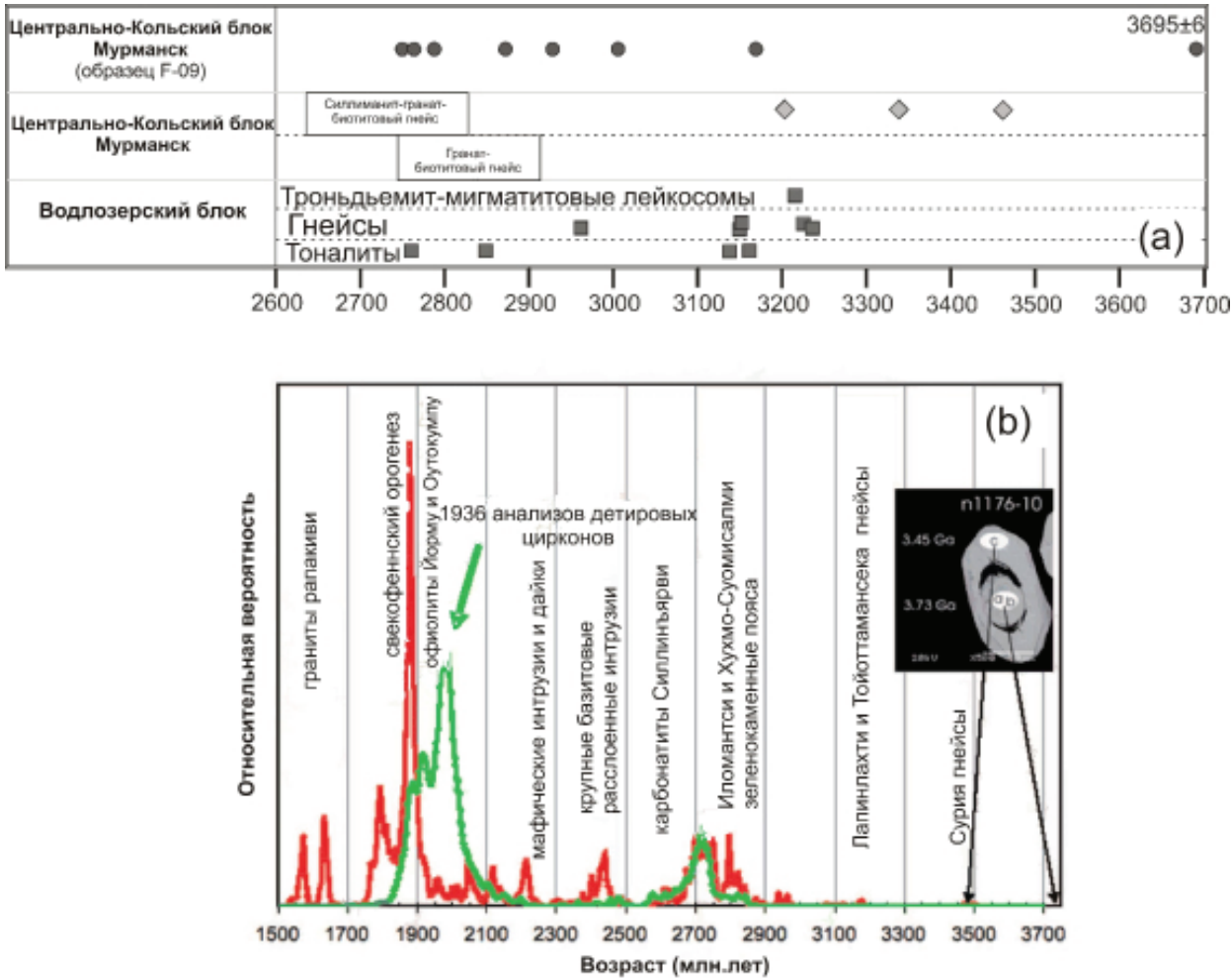


Рис. 3. Суммированные возрастные изотопные данные для пород С-В части Фенноскандинавского щита (а) и Sm-Nd данные для интрузий (b) Финляндии (990 образцов, 740 опубликовано)

Fig. 3. Summed age isotopic data for rocks of the N-E part of the Fennoscandian Shield (a) and Sm-Nd data for intrusions (b) in Finland (990 samples, 740 published)

вано на прецизионном U-Pb датировании единичных зерен цирконов и их ядерных частей методами SHRIMP и Nordsim, а также Sm-Nd и Rb-Sr изотопном исследовании пород. Результаты изотопно-геохимических исследований приведены табл. 4 и 5.

Таблица 4. Изотопно-геохимические Sm-Nd данные для пород Центрально-Кольского и Мурманского мегаблоков

Table 4. Isotope-geochemical Sm-Nd data for rocks of the Central Kola and Murmansk megablocks

№	Номера проб	Порода	Концентрации, мкг/г		Изотопные отношения		±2s	Т, млн лет	ε _{Nd} (T)	Т _{DM} ?, млн лет
			Sm	Nd	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd				
Центрально-Кольский мегаблок										
Плагиограниты и тоналиты										
1	MSK-11/1	Гранит с сульфидной минерализацией	1.442	7.946	0.1096	0.511063	14	2.81	0.80	3039
2	MSK-34/1	Q-ПШ-Вt порода с сульфидами	3.079	16.41	0.1134	0.510921	8	2.81	-3.38	3366
3	MSK-35/1	Q-ПШ порода с сульфидами	0.754	4.113	0.1108	0.510818	13	2.81	-4.46	3431
4	MSK-38/2	Мигматит с сульфидами	3.609	19.13	0.1140	0.511103	10	2.81	-0.02	3112
5	MSK-53/2	Тоналит	4.223	30.73	0.0831	0.510616	9	2.81	1.67	2942

Продолжение таблицы 4

№	Номера проб	Порода	Концентрации, мкг/г		Изотопные отношения		±2s	T, млн лет	ε _{Nd} (T)	T _{DM²} , млн лет
			Sm	Nd	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd				
Гнейсы и амфиболиты										
6	MSK-7/1	Гранат-биотитовый гнейс	2.178	12.827	0.1026	0.510908	7	2.81	0.30	3059
7	MSK-8/1	Биотитовый гнейс с гранатом и сульфидной минерализацией	2.204	13.048	0.1017	0.510849	4	2.81	-0.53	3114
8	MSK-13/1	Гранат-ставролит-биотитовый гнейс с кианитом	2.736	12.328	0.1041	0.510887	10	2.81	-0.66	3129
9	MSK-14/1	Гранат-биотитовый гнейс	2.002	16.454	0.1235	0.511305	19	2.81	0.48	3101
10	MSK-17/1	Биотитовый гнейс с гранатом	2.698	13.583	0.1132	0.510975	21	2.81	-2.25	3279
11	MSK-19/2	Гранат-биотит-ставролитовый гнейс	3.913	21.892	0.1080	0.511036	5	2.81	0.85	3032
12	MSK-24/1	Биотит-пироксеновый гнейс	7.532	41.578	0.1095	0.511047	10	2.81	0.52	3060
13	MSK-26/1	Метагабброиды	3.880	25.336	0.0926	0.510812	12	2.81	2.06	2928
14	MSK-26/3	Метагабброиды	3.465	19.384	0.1080	0.510835	10	2.81	-3.10	3317
15	MSK-27	Гранат-биотитовый гнейс	2.669	14.928	0.1081	0.5109	15	2.81	-1.86	3228
16	MSK-34/2	Гранат-биотитовый гнейс	2.012	11.822	0.1029	0.51087	10	2.81	-0.56	3119
17	MSK-37/1	Гранат-биотитовый гнейс с сульфидами	4.081	23.134	0.1066	0.510804	4	2.81	-3.20	3318
18	MSK-39/1	Амфибол-биотитовый гнейс (метагабброид)	4.456	26.961	0.0999	0.510868	12	2.81	0.50	3040
19	MSK-40/2	Двуслюдяной гнейс	3.419	20.663	0.1000	0.510901	5	2.81	1.11	2999
20	MSK-41/1	Биотит-пироксеновый гнейс	2.998	6.847	0.1447	0.511694	10	2.81	0.40	3200
21	MSK-42/1	Двуслюдяные гнейсы с про-слоями плагиогранитов с сульфидами	4.194	15.231	0.1065	0.511034	9	2.81	1.35	2993
22	MSK-51/1	Биотит-амфиболовый гнейс	10.727	48.912	0.1325	0.511473	9	2.81	0.51	3131
Интенсивно измененные породы										
23	MSK-7/2	Амфиболит с сульфидной минерализацией	5.152	23.851	0.1015	0.510858	16	2.50	-4.14	3096
24	MSK-37/2	Тальк-хлорит-биотитовые сланцы	1.672	7.585	0.1333	0.511414	9	2.20	-5.99	3272
25	MSK-37/3	Тальк-хлорит-биотитовые сланцы с сульфидами	3.086	16.568	0.1126	0.511122	11	2.20	-5.83	3041
26	MSK-36/2	Биотит-мусковитовый гнейс интенсивно рассланцованный	2.757	14.821	0.1124	0.510997	20	2.20	-8.23	3220
Нестратифицированный комплекс										
27	MSK-53/1	Амфибол-биотитовый гнейс	17.682	88.36	0.1209	0.511170	4	2.81	-1.22	3233
28	MSK-53/4	Амфибол-биотитовый гнейс	8.184	45.059	0.1197	0.511181	10	2.81	-0.57	3175
29	MSK-53/6	Амфибол-биотитовый гнейс	8.72	45.948	0.1147	0.511174	23	2.81	1.12	3026
30	MSK-53/7	Амфиболит	13.054	76.153	0.1136	0.510914	9	2.81	-3.59	3383
31	MSK-53/8	Амфиболит	22.426	70.772	0.1215	0.511076	9	2.81	-3.29	3407
32	MSK-53/8	Амфиболит	22.426	70.772	0.1215	0.511076	9	2.81	-3.29	3407
Мурманский мегаблок, Териберка										
33	MSK-28	Гранодиоритогнейс	2.846	10.49	0.1039	0.510817	18	2.81	-1.96	3219
34	MSK-30/2	Гранодиоритогнейс	4.967	23.837	0.1260	0.511337	10	2.81	0.20	3134
35	MSK-31	Плагиогранит с ксенолитами	12.555	26.823	0.1829	0.512490	12	2.81	2.12	3257
36	MSK-50	Плагиогранит	4.654	31.476	0.0893	0.510666	14	2.81	0.39	3027

Примечание. Методика изотопных Sm-Nd измерений представлена в работе (Екимов и др., 2011).

Таблица 5. Изотопно-геохимические Rb–Sr данные для пород
Центрально-Кольского и Мурманского мегаблоков
Table 5. Isotope-geochemical Rb–Sr data for rocks of the Central Kola and Murmansk megablocks

Номера проб	Порода	Содержание, мкг/г		Изотопные отношения			Т, млн. лет	ISr(T)	εSr(T)
		Rb	Sr	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	± 2σ			
MSK-53/1	Гнейс	54.64	1332.4	0.115702	0.70849	0.00018	2.7	0.70397	39.4
MSK-51/1	Гнейс	166.84	1462.2	0.321921	0.71893	0.00014	2.7	0.70635	73.4
MSK-53/6	Гнейс	105.22	1025.9	0.289373	0.71489	0.00015	2.7	0.70358	33.89
MSK-53/8	Амфиболит	20.58	235.8	0.246244	0.70781	0.00017	2.7	0.69819	-43.03
MSK-87	Амфиболит	31.01	228.3	0.321921	0.70981	0.00023	2.7	0.69723	-56.69
MSK-53/7	Амфиболит	176.05	1445.2	0.343695	0.71919	0.00039	2.7	0.70576	64.94
MSK-51/4a	Амфиболит	135.59	1100.6	0.347586	0.71687	0.00017	2.7	0.70328	29.7
MSK-7/2	Амфиболит	23.18	133.9	0.488315	0.71776	0.00019	2.7	0.69867	-36.1
MSK-11/5a	Эндербит	80.75	390.8	0.582979	0.72453	0.00024	2.7	0.70174	7.7
MSK-5/5a	Эндербит	134.98	334.0	1.140081	0.73570	0.00017	2.7	0.69814	-143.5
MSK-16/3a	Тоналит	155.49	144.3	3.040401	0.78188	0.00026	2.7	0.69805	-544.2

Примечание. Методика изотопных Rb–Sr измерений представлена в работе (Баянова, 2004).

Изотопные ICP-MS данные

Изучение Ir аномалии для пород Центрально-Кольского мегаблока – амфиболитов, эндербитов, серых гнейсов и тоналитов было начато в 2017 году после изучения статей и книг (Triatise on Geochemistry, 2003; Glikson et al., 2010, 2014; Kranendonk et al., 2019 и др.), посвященных формированию пород и метеоритным бомбардировкам на этапах ранней истории Земли, данные о которых суммированы в работах (Schmieder et al., 2020; Koeberl et al., 2024).

В табл. 6 и 7 приведены новые геохимические ICP-MS данные для изученных пород.

Таблица 6. Концентрации основных, редкоземельных и литофильных элементов в породах
Центрально-Кольского мегаблока
Table 6. Concentrations of major, rare earth, and lithophile elements in rocks
of the Central Kola megablock

Образец	MSK-5/5a	MSK-11/5a	MSK-16/3a	MSK-51/1	MSK-53/6	MSK-53/1	MSK-51/4a	MSK-53/7	MSK-53/8	MSK-87	MSK-51/3a	MSK-7/2
	Эндербиты		Тоналиты	Гнейсы			Амфиболиты					
%												
SiO ₂	70.9212	65.25	72.404	45.09	53.75	65.9	65.89	65.04	45.38	65.51	65.7	54.859
Al ₂ O ₃	16.59	14.40	13.50	16.64	16.74	14.13	14.13	14.49	8.02	14.29	14.21	21.29
TiO ₂	0.12	0.52	0.32	0.89	0.62	0.51	0.51	0.52	0.51	0.52	0.51	1.01
Fe ₂ O ₃ *	1.70	5.72	3.85	8.34	5.87	5.62	5.62	5.76	11.07	5.68	5.65	10.81
MgO	0.30	2.48	1.36	7.80	5.42	2.43	2.43	2.49	11.03	2.46	2.45	4.41
MgO	0.30	2.48	1.36	7.80	5.42	2.43	2.43	2.49	11.03	2.46	2.45	4.41
CaO	2.12	3.52	1.64	5.91	4.39	3.45	3.46	3.54	10.21	3.49	3.47	0.99
Na ₂ O	3.96	3.94	3.34	3.20	3.74	3.87	3.87	3.97	1.54	3.91	3.89	1.60
K ₂ O	3.98	1.57	2.20	3.72	3.63	1.54	1.54	1.58	0.30	1.56	1.55	0.55
P ₂ O ₅	0.0088	0.12	0.026	0.61	0.42	0.12	0.12	0.12	0.91	0.12	0.12	0.071
ppm												

Продолжение таблицы 6

Образец	MSK-5/5a	MSK-11/5a	MSK-16/3a	MSK-51/1	MSK-53/6	MSK-53/1	MSK-51/4a	MSK-53/7	MSK-53/8	MSK-87	MSK-51/3a	MSK-7/2
	Эндербиты		Тоналиты	Гнейсы			Амфиболиты					
%												
La	14.9	36.9	22.8	54.5	53.5	36.2	36.2	37.1	52.2	36.6	36.4	29.7
Ce	24.5	62.4	41.1	116.7	105.9	61.2	61.2	62.8	139.7	61.9	61.6	56.8
Pr	2.62	6.14	4.49	14.2	12.2	6.02	6.02	6.18	19.7	6.09	6.06	6.26
Nd	9.63	21.4	16.7	58.8	48.6	21.0	21.0	21.6	89.3	21.3	21.1	24.3
Sm	2.10	4.52	4.24	16.4	14.2	4.44	4.44	4.55	17.5	4.49	4.46	3.97
Eu	0.79	1.37	0.72	3.35	2.47	1.34	1.34	1.38	3.81	1.36	1.35	0.94
Gd	1.30	2.85	2.56	10.0	7.99	2.80	2.80	2.87	15.5	2.83	2.82	4.35
Tb	0.11	0.25	0.33	1.08	0.82	0.24	0.24	0.25	1.75	0.24	0.24	0.64
Dy	0.52	1.12	1.67	4.51	3.19	1.09	1.10	1.12	6.91	1.11	1.10	3.72
Ho	0.05	0.21	0.25	0.68	0.51	0.20	0.20	0.21	1.12	0.20	0.20	0.73
Er	0.25	0.53	0.74	2.16	1.56	0.52	0.52	0.54	3.21	0.53	0.53	2.10
Tm	0.012	0.043	0.10	0.23	0.16	0.043	0.043	0.044	0.37	0.043	0.043	0.30
Yb	0.084	0.35	0.57	1.56	1.02	0.34	0.34	0.35	2.45	0.35	0.34	2.11
Lu	0.023	0.11	0.089	0.21	0.15	0.10	0.10	0.11	0.34	0.10	0.10	0.33
REE	57.0	138.3	96.5	284.3	252.4	135.7	135.7	139.2	353.7	137.2	136.5	136.4
ppm												
Sc	55.1	55.7	4.64	13.2	5.83	54.6	54.6	56.0	30.2	55.2	54.9	29.2
Y	1.35	4.54	5.65	16.6	12.1	4.45	4.46	4.57	26.0	4.51	4.48	15.6
Zr	76.3	159.8	86.8	191.3	122.7	156.8	156.9	160.9	121.4	158.6	157.7	145.3
Nb	3.77	9.88	3.53	8.03	6.11	9.70	9.70	9.95	2.47	9.81	9.75	3.54
Ba	708.5	374.3	429.2	1447	1638	367.2	367.3	376.7	75.0	371.5	369.4	84.3
Hf	2.25	4.59	2.27	4.42	2.74	4.50	4.50	4.62	3.09	4.55	4.53	4.19
Ta	2.08	1.77	0.33	0.45	0.22	1.74	1.74	1.78	1.15	1.76	1.75	0.52
Th	2.34	13.5	6.34	5.53	6.00	13.3	13.3	13.6	3.45	13.4	13.3	5.65
U	1.84	1.01	2.56	0.64	0.22	0.99	0.99	1.01	1.16	1.00	0.99	0.91

Примечание. * – суммарное железо приведено в форме Fe_2O_3 .
 Методика измерений методом ICP приведена в работе (Николаев и др., 2016).

Таблица 7. Концентрации ЭПГ, Au, Ag, Cu и Ni в образцах
 Table 7. Concentrations of PGE, Au, Ag, Cu, and Ni in the samples

Образец	MSK-5/5a	MSK-11/5a	MSK-16/3a	MSK-51/1	MSK-53/6	MSK-53/1	MSK-51/4a	MSK-53/7	MSK-53/8	MSK-87	MSK-51/3a	MSK-7/2
	Эндербиты		Тоналиты	Гнейсы			Амфиболиты					
ppb												
Ru	0.071	0.069	0.026	0.020	0.034	0.034	0.043	0.026	0.16	0.028	0.045	0.035
Rh	0.280	0.180	0.001	0.013	0.019	0.044	0.093	0.020	0.82	0.009	0.163	0.027
Pd	14.400	17.400	2.240	3.570	4.090	4.440	7.280	4.090	64.90	2.660	10.700	5.660
Ag	0.210	0.250	0.310	0.250	0.220	0.210	0.110	0.160	1.37	0.340	0.380	0.450
Ir	0.120	0.130	0.100	0.110	0.100	0.082	0.090	0.081	0.20	0.059	0.120	0.148
Pt	5.060	6.080	1.650	0.820	1.680	2.930	3.700	1.200	12.60	1.390	2.540	2.040
Au	0.870	1.420	0.340	0.081	0.150	0.290	0.420	0.074	3.69	0.200	1.280	0.320
Ni	8.680	20.900	25.200	108.200	75.600	97.500	124.300	139.600	186.20	150.100	69.900	143.700
Cu	9.600	15.000	24.400	22.300	3.840	1.800	33.400	17.500	42.40	62.500	113.800	426.500

Примечание. Методика изотопных ЭПГ, Au, Ag, Cu и Ni методом ICP-MS приведена в работе (Чашин и др., 2018).

Выводы

В международной геологической литературе известно всего 35 выходов древнейших эоархей-палеоархейских ТТГ пород на всех кратонах мира (Bleeker, 2003). Новые Nordsim и SHRIMP данные по эоархейским цирконам из ТТГ гнейсов для пород фундамента Фенноскандинавского щита – гнейсы Siurua (Финляндия) и на территории г. Мурманск были определены недавно и являются существенным вкладом в мировой банк данных.

Таким образом, проведенное комплексное U-Pb и SHRIMP-II датирование магматических цирконов и их реликтовых ядер отразило два импульса формирования континентальной коры С-В части Фенноскандинавского щита ~ 3.70 и 3.16 млрд лет, что является важным для прогнозирования и изучения потенциала ЭПГ, Cr, Cu-Ni и BIF месторождений (Древнейшие породы СССР, 1984; Mitrofanov et al., 2019; Bayanova et al, 2022; Кольская платинометалльная провинция, 2023). Изотопно-геохимические Sm-Nd данные (модельный Sm-Nd возраст T_{DM}) для пород фундамента двух мегаблоков отразили интервалы формирования протолитов исходных пород от 3.4 до 2.9 млрд лет (табл. 4). Первичное значение Isr для гнейсов, амфиболитов, энтербитов и тоналитов двух мегаблоков, рассчитанных на время метаморфизма в 2.7 млрд лет отразило мантийные значения для протолитов исходных пород, вероятно близких по природе с псевдотахилитами на Анабарском щите (Глуховский и др., 2009).

Изучение методами ICP-MS концентраций ЭПГ, Ag, Au, Ni и Cu пород фундамента двух мегаблоков С-В части Фенноскандинавского щита впервые подтвердило вклад внеземного вещества на ранних этапах развития Земли.

Благодарности

Д. Вассербургу за 205 искусственный трассер. Ф. Корфу, У. Поллер, В. Тодту за помощь в постановке U-Pb метода по единичным зернам акцессорных минералов.

Работа выполнена в рамках темы НИР ГИ КНЦ РАН № FMEZ-2024-0004 и посвящена светлой памяти академика РАН Митрофанова Ф. П. (1935–2014), который всегда считал, что Балтийский щит является одним из древнейших в Мире.

Литература

1. Баянова Т. Б. Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма / Под ред. акад. Ф. П. Митрофанова. СПб. Изд-во: Наука. 2004. 172 с.
2. Глуховский М. З., Кузьмин М. И., Баженова Г. Н., Баянова Т. Б., Елизаров Д. В., Серов П. А. Sm-Nd и Rb-Sr-возраст и возможная природа псевдотахилитов Анабарского щита // Доклады АН. 2009. Т. 425, № 4. С. 513–518.
3. Древнейшие породы СССР / Под ред. Митрофанова Ф. П. и Крыловой М. Д. 1984. Л. Изд-во: Наука. 91 с.
4. Екимова Н. А., Серов П. А., Баянова Т. Б., Елизарова И. Р., академик Митрофанов Ф. П. Распределение РЗЭ в сульфидных минералах и Sm-Nd датирование рудогенеза расслоенных базитовых интрузий // Доклады АН. 2011. Т. 436, № 1. С. 75–78.
5. Митрофанов Ф. П. и др. Кольская платинометалльная провинция. Апатиты. Изд-во: ФИЦ КНЦ РАН. 2023 г. 195 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.493.8>.
6. Морозова Л. Н., Митрофанов Ф. П., Баянова Т. Б., Ветрин В. Р., Серов П. А. Гомологи архейских пород разреза Кольской сверхглубокой скважины в северной части Беломорского подвижного пояса (полигон Воче-Ламбина) // Доклады АН. 2012. Т. 442, № 2. С. 215–218.
7. Мыскова Т. А., Милькевич Р. И., Глебовицкий В. А., Львов П. А., Бережная Н. Г. Новые данные о возрасте (U-Pb, SHRIMP-II) цирконов из глиноземистых гнейсов Кольской серии архея Балтийского щита и проблема их интерпретации // Доклады АН. 2015. Т. 463, № 3. С. 323.
8. Чекулаев В. П., Арестова Н. А., Глебовицкий В. А., Лобач-Жученко С. Б., Матвеева Л. В., Лепёхина Е. Н. Новые данные о возрасте архейских пород Заонежья (Водлозерский домен Карельского кратона) // Доклады АН. 2013. Т. 451, № 6. С. 670.
9. Чашин В. В., Петров С. В., Дрогобужская С. В. Малосульфидное платино-палладиевое месторождение Лойпишнюн Мончетундровского базитового массива (Кольский полуостров, Россия) // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60, № 5. С. 472–503.

10. Arndt N. How did the continental crust form: No basalt, no water, no granite // *Precambrian Research*. 2023. V. 397. P. 107196. <https://doi.org/j.precamres.2023.107196>.
11. Bayanova T. B., Bazay A. V., Steshenko E. N., Kunakkuzin E. L., Serov P. A., Borisenko E. S., Elizarov D. V. Mesoarchean banded iron formations of the Fennoscandian Shield: new zirconU-Pb (ID-TIMS and SHRIMP-II) isotope ages of noble metal mineralization and Nd-Sr data on whole rocks // *International Geology Review*. 2022. P. 1–15. <https://doi.org/10.1080/00206814.2022.2153386>.
12. Bleeker W. The late Archean record: puzzle in ca. 35 pieces // *Lithos*. 2003. V. 71. P. 99–134.
13. Glikson A. Y., Vickers J. Asteroid impact connections of crustal evolution // *Australian Journal of Earth Sciences*. 2010. V. 57. P. 79–95.
14. Glikson A. Y. *The Archean: Geological and Geochemical Windows into the Early Earth*. Springer. 2014. V. 238 p.
15. Hanchar E., Hoskin P. Zircon. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. Mineralogical Society of America. 2003. V. 53. 500 p.
16. Hölttä P., Heilimo E., Huhma H., Juopperi H., Kontinen A., Konnunaho H., Lauri L., Mikkola P., Paavola J., Sorjonen-Ward P. Archean complexes of the Karelia Province in Finland // *Geological Survey of Finland. Special Paper*. 2012. No. 54. P. 9–20.
17. Huhma H., Manttari I., Peltonen P., Kontinen A., Halkoaho T., Hanski E., Hokkanen T., Hölttä P., Juopperi H., Konnunaho J., Layahe Y., Luukkonen E., Pietikäinen K., Pulkkinen A., Sorjonen-Ward P., Vaasjoki M., Whitehouse M. The age of Archean greenstone belts in Finland // *Geological Survey of Finland, Special. No. 54*. 2012. P. 74–175.
18. Koeberl C., Schulz T., Huber M. S. Precambrian impact structures and ejecta on earth: A review // *Precambrian Research*. 2024. V. 411. P. 107511. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2024.107511>.
19. Larionov A. N., Andreichev V. A., 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.) D. G. GEE & V. L. PEASE. Geological Society, London, Memoirs*. 2004. No. 30. P. 69–74.
20. Lobach-Zhuchenko S. B., Chekulayev V. P., Sergeev S. A., Levchenkov O. A., Krylov I. N. Archean rocks from southeastern Karelia (Karelian granite greenstone terrain) // *Precambrian Research*. 1993. V. 62. P. 375–397.
21. Moyen J-F, Martin H. Forty years of TTG research // *Lithos*. 2012. V. 148. P. 312–336.
22. Mitrofanov F. P., Bayanova T. B., Korchagin A. U., Chashchin V. V., Nerovich L. I., Serov P. A., Zhirov D. V., Ludden J. N., Mitrofanov A. F. Origin and exploration of the Kola PGE-bearing province: new constraints from geochronology // *Geophysical Monograph Series*. 2019. No. 242. P. 3–36.
23. Nerovich L. I., Kaulina T. V., Bayanova T. B., Il'chenko V. L., Gannibal M. A., Kunakkuzin E. L., Bazai A. V., Mudruk S. V., Borisenko E. S., Sosnovskaya M. A. Granophyre Norites and Diorites of the Jarva-Varaka Massif (Monchegorsk Ore Area, Kola Region, Russia): Geology, Petrography, Geochemistry, Geochronology and Origin // *Geochemistry International*. 2023. P. 1–21. <https://doi.org/10.1134/S0016702923060071>.
24. Sergeev S. A., Bibikova E. V., Matukov D. I., Lobach-Zhuchenko S. B. Age of the magmatic and metamorphic processes in the Vodlozero complex, Baltic Shield: an ion microprobe (SHRIMP II) U-Th-Pb isotopic study of zircons // *Geochemistry International*. 2007. V. 45, No. 2. P. 198–205.
25. Schmieder M., Kring D. A. Earth's Impact Events Through Geologic Time: A List of Recommended Ages for Terrestrial Impact Structures and Deposits // *Astrobiology*. 2020. V. 20, No. 1. P. 91–141. <https://doi.org/10.1089/ast.2019.2085>.
26. Stacey J. S., Kramers J. D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth and Planet. Sci. Lett*. 1975. V. 26, No. 2. P. 207–221.
27. *Treatise on Geochemistry* // Elsevier Science. 2003. V. 1–3. 7800 p.
28. *Earth's Oldest Rocks / (Eds.) M. J. Van Kranendonk, V. C. Bennett, J. E. Hoffmann*. Amsterdam: Elsevier. 2019. 1112 p.