

DOI <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1484.01>

© Д. чл. М. Н. ПЕТРОВСКИЙ

НИЗЬЯВРСКИЙ ЩЕЛОЧНОЙ МАССИВ: ВОЗРАСТ, ИЗОТОПНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕДКОМЕТАЛЛЬНОЕ ОРУДЕНЕНИЕ

*Геологический институт Кольского научного центра РАН,
184209, Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14;
e-mail: petrovskiy@geoksc.apatity.ru*

Низьяврский щелочной массив имеет двухфазное строение и сложен щелочными сиенитами и щелочными кварцевыми сиенитами. Возраст кристаллизации щелочных кварцевых сиенитов второй фазы равен 2656 ± 3 млн лет. По изотопно-геохимическим (Rb-Sr, Sm-Nd) характеристикам породы массива имеют мантийное происхождение. Источником их расплавов, как и для других неархейских щелочных интрузий Кольской провинции, относящихся к формации щелочных габбро—нефелиновых сиенитов—щелочных сиенитов—граносиенитов, вероятно, являлась мантия типа BSE. В породах массива установлено Ta-Nb оруденение, представленное пироксеном, что отличает его от других неархейских щелочных массивов провинции.

Ключевые слова: щелочные сиениты, неархей, пироксен, Кольская щелочная провинция.

M. N. PETROVSKIY. NIZ'YAVRSKI ALKALINE MASSIF: AGE, ISOTOPIC CHARACTERISTICS AND RARE-METAL MINERALIZATION

Geological Institute, Kola Science Centre RAS, Apatity, Russia

The Niz'yavrski alkaline massif includes the rocks of two intrusive phases: (1) alkaline syenites and (2) alkaline quartz syenites. The crystallization age of the latter determined by the U-Pb method for zircon is 2656 ± 3 Ma. According to isotopic (Rb-Sr and Sm-Nd) data, the rocks of the massif have a mantle origin. It is suggested that the source of their melts, as well as the source of melts for other Neoproterozoic alkaline intrusions of the Kola province belonging to the association of alkaline gabbro, nepheline syenites, alkaline syenites, and granosyenite, was the BSE mantle reservoir. Rocks of the massif contain Ta-Nb mineralization represented by pyrochlore, which distinguishes the studied intrusion from the other Neoproterozoic alkaline magmatic bodies of the province.

Key words: alkaline syenites, pyrochlore, Neoproterozoic, Kola alkaline province.

Проблема образования редкометалльных рудно-магматических систем остается одной из наиболее спорных в геологии. В Кольской щелочной провинции Ta-Nb оруденение установлено в силекситах и кварц-эпидотовых метасоматитах, приуроченных к Кейвским щелочным гранитам. Оно представлено фергусонитом-(Ce) и единичными зернами пироксена (Bagiński et al., 2016; MacDonald et al., 2017). Пироксеновое оруденение характерно лишь для щелочных массивов протерозойского и палеозойского возрастов (Волошин и др., 1981; Сорохтина и др., 2010; Афанасьев, 2011). В щелочных массивах неар-

хейского возраста пирохлор и единичные зерна колумбита обнаружены только в Низьяврском массиве.

Низьяврский щелочной массив был открыт Д. Д. Мирской в 1950 г. (Мирская, 1958). Первоначально он был отнесен к щелочно-гранитной формации (Батиева, 1976); в работах последних лет — к формации щелочных габбро—нефелиновых сиенитов—щелочных сиенитов—щелочных кварцевых сиенитов (Петровский, Петровская, 2017; Петровский, 2019). До настоящего времени массив оставался практически неизученным.

В предлагаемой статье приводятся новые данные о геологическом строении Низьяврского массива, результаты изотопно-геохимических исследований пород массива и минералогических исследований, связанного с ним Ta-Nb оруденения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический состав пород анализировался методом классического количественного анализа в химико-аналитической лаборатории ГИ КНЦ РАН (аналитик Л. И. Константинова). Содержания редких и рассеянных элементов в породах определялись ISP-MS методом в Лаборатории спектрометрических методов анализа ИХТРЭМС КНЦ РАН (аналитик И. В. Елизарова). Химический состав минералов изучался с помощью микрозондового анализа (Cameca MS-46) в Лаборатории физических методов ГИ КНЦ РАН (аналитик А. В. Базай).

Возраст пород массива был определен U-Pb методом по циркону в Лаборатории геохронологии и изотопной геохимии ГИ КНЦ РАН (аналитик Т. Б. Баянова). Химическое разложение циркона и измерение концентраций урана и свинца проводилось согласно методике, детально описанной ранее (Баянова, 2004). Расчеты координат точек и параметров U-Pb изохрон выполнялись с помощью программы К. Людвига (Ludwig, 1999). Ошибки определения возраста рассчитаны с надежностью 95 % (2σ). Коррекция на примесь обыкновенного свинца определена на возраст согласно модели Стейси—Крамперса (Stacey, Kramers, 1975). В расчетах использовались константы распада из работы (Steiger, Jäger, 1977). Изотопные U-Pb исследования проводились на семиканальном твердофазном масс-спектрометре Finnigan-MAT-262 (RPQ) в статическом режиме, ошибки воспроизводимости по осям приняты равными 0.5 %.

Изотопно-геохимические исследования Rb-Sr и Sm-Nd методами выполнены по стандартным методикам (Баянова, 2004) в Лаборатории геохронологии и изотопной геохимии ГИ КНЦ РАН (аналитик Д. В. Елизарова). 2σ погрешности изотопного анализа для Sr и Rb < 0.04 %, определения Rb-Sr отношения < 1.5 %, определения изотопного состава Nd < 0.0024 %, определения Sm-Nd отношения < 0.2 %.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МАССИВА

Низьяврский щелочной массив располагается в 135 км к северо-востоку от п. Ловозеро в среднем течении р. Иоканьга южнее оз. Низьявр. В геологическом отношении он приурочен к Мурманскому неoarхейскому кратону. Массив представляет собой изометричный шток, имеющий в плане размеры 3×4 км.

37°29'
67°59'

37°44'

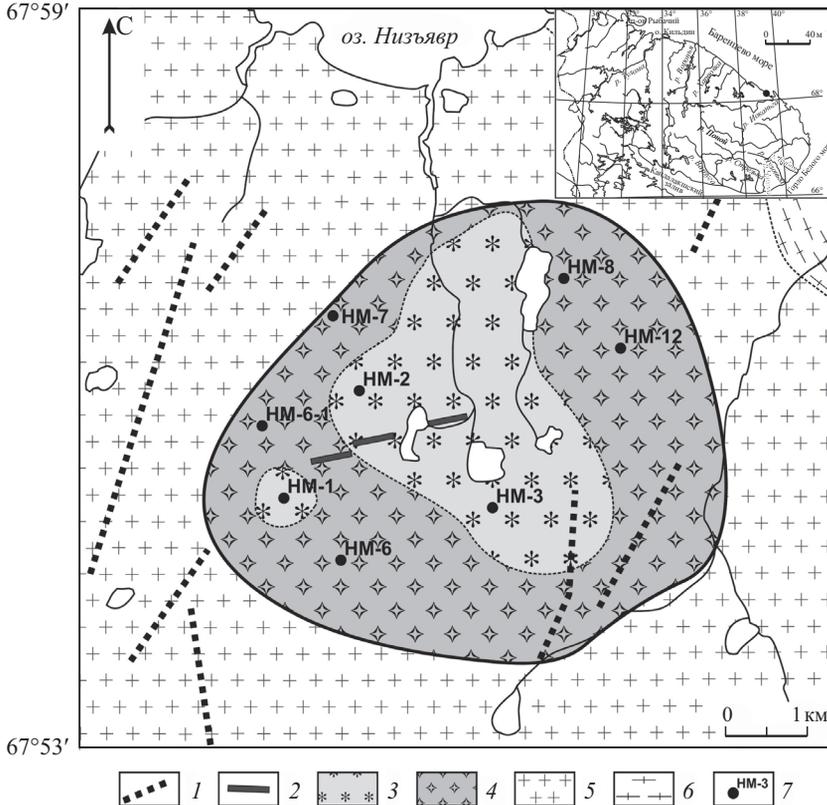


Рис. 1. Схема геологического строения Низьяврского массива по литературным данным (Мирская, 1958) и материалам СЗТГУ с уточнениями автора.

1 — дайки габбро-норитов, 2 — жилы щелочных кварцевых сиенитов, 3 — щелочные кварцевые сиениты, 4 — щелочные сиениты, 5 — гранодиориты Колмозерского массива, 6 — плагиогранито-гнейсы Мурманского блока, 7 — места отбора проб.

Fig. 1. Schematic geological map of the Niz'yavrskiy massif according to Mirskaja (1958) and NWTGA data with author's corrections.

Схематическая геологическая карта массива показана на рис. 1. Массив имеет зональное строение: его периферическая часть сложена щелочными сиенитами (1-я интрузивная фаза), ядро — щелочными кварцевыми сиенитами (2-я интрузивная фаза). Породы обеих фаз секутся жилами щелочного кварцевого сиенита по внешнему облику и минеральному составу, сходному с кварцевыми сиенитами ядра массива. Скорее всего, жильные породы и породы ядра комплементарны. Контакты с вмещающими породами резкие, интрузивные; падение поверхностей контактов субвертикальное. Вмещающими породами являются кварцевые диориты и гранодиориты Колмозерского санукитоидного массива, их возраст — 2736 ± 4 млн лет (Кудряшов и др., 2013). В приконтактной зоне массива, имеющей мощность около 10 м, вмещающие породы перекристаллизованы. В самих породах Низьяврского массива, кроме расланцевания в зонах разломов, метаморфических изменений не отмечено. Это связано с тем, что внедрение расплава, родоначального для Низьяврского массива, произошло после этапа неoarхейского регионального метаморфизма, а свекофеннский региональный метаморфизм в пределах Мурманского

неоархейского кратона не имеет площадного распространения и фиксируется только лишь вдоль зон разломов (Петров и др., 1990; Петровский и др., 2009; Кудряшов и др., 2013). Породы массива секутся дайками оливиновых габбро-норитов с возрастом 2.5 млрд лет (Арзамасцев и др., 2009).

ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОРОД

Щелочные сиениты 1-й фазы представлены светло- и зеленовато-серыми средне-крупнозернистыми массивными породами, состоящими из крупных зерен калиевого полевого шпата (40—50 %), альбита (30—40 %), арфведсонита (10—14 %) и эгирина (1—2 %). Акцессорные минералы представлены флюоритом, пироксеном, цирконом, ниобиевым рутилом, монацитом, апатитом. Содержание флюорита в эндоконтактных разновидностях пород достигает 5 %. Пироксен распространен в щелочных сиенитах равномерно, в некоторых образцах его содержание достигает 0.5—0.7 %. Он образует зерна размером до 2 мм, приуроченные к интерстициям между зернами калиевого полевого шпата и альбита. С пироксеном иногда ассоциирует ниобиевый рутил.

По данным химического анализа (табл. 1), щелочные сиениты являются высоко железистыми породами (Fe# 72—76 %) калий-натровой щелочной

Таблица 1

**Химический состав (мас. %) и содержание элементов-примесей (г/т)
в породах Низьявского массива**

**Chemical compositions (wt %) and contents of minor elements (ppm)
in rocks of the Niz'yavrski massif**

Компонент	Щелочные сиениты					Щелочной кварцевый сиенит
	НМ-6/99	НМ-6-1/99	НМ-7/99	НМ-8/99	НМ-12/99	НМ-3/99
SiO ₂	59.27	58.08	60.46	58.97	59.34	63.25
TiO ₂	1.29	1.31	0.72	1.24	1.24	0.34
Al ₂ O ₃	15.49	14.62	15.55	14.88	15.36	13.70
Fe ₂ O ₃	3.49	4.61	3.86	4.32	3.55	3.13
FeO	3.55	4.44	3.19	3.61	3.67	3.59
MnO	0.11	0.19	0.10	0.27	0.09	0.08
MgO	1.40	1.52	1.24	1.53	1.38	1.29
CaO	0.89	1.93	0.86	0.95	0.72	1.12
Na ₂ O	4.92	5.37	5.03	5.53	4.95	4.36
K ₂ O	7.69	6.08	7.72	6.63	7.86	7.52
P ₂ O ₅	0.02	0.07	0.03	0.12	0.02	0.03
S	0.03	0.09	0.04	0.13	0.06	0.10
F	0.33	0.34	0.08	0.48	0.43	0.49
H ₂ O ⁻	0.29	0.27	0.26	0.29	0.31	0.25
H ₂ O ⁺	1.14	1.02	0.82	1.02	0.95	0.73
Сумма	99.91	99.94	99.96	99.97	99.93	99.98
Rb	192	255	184	161	190	321
Ba	50	110	46	35	61	38
Sr	212	206	171	145	194	168
Ta	6	4	9	5	8	11

Таблица 1 (продолжение)

Компонент	Щелочные сиениты					Щелочной кварцевый сиенит
	НМ-6/99	НМ-6-1/99	НМ-7/99	НМ-8/99	НМ-12/99	НМ-3/99
Nb	120	185	213	80	132	210
Hf	8	11	9	16	11	13
Zr	456	604	552	532	598	614
Y	26	41	30	44	31	56
Th	11.2	17.3	14.7	15.4	10.9	25.4
U	3.2	4.8	5.4	4.2	3.1	14.3
La	30.3	62.8	25.4	54.5	59.9	61.5
Ce	35.8	78.5	47.5	60.8	56.3	84.1
Pr	7.6	18.3	5.3	10.3	5.8	16.4
Nd	40.8	53.7	87.7	43.1	44.4	55.9
Sm	8.2	11.6	16.1	9.7	4.8	18.3
Eu	0.27	0.33	0.38	0.29	0.25	0.39
Gd	5.3	9.22	6.5	5.2	5.8	16.4
Tb	0.83	0.94	0.96	0.79	0.65	1.26
Dy	6.1	3.9	6.4	5.9	4.2	8.7
Ho	1.18	0.9	1.16	1.14	1.11	3.04
Er	3.45	2.48	3.93	3.88	2.90	7.97
Tm	0.66	0.61	0.61	0.70	0.63	1.09
Yb	4.76	2.95	5.02	4.52	4.74	5.57
Lu	0.44	0.68	0.71	0.78	0.59	1.48

серии (n 49—58 %).¹ По содержанию SiO_2 (58—61 мас. %) они относятся к породам средней группы, по содержанию суммы щелочей $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (11—13 мас. %) являются умеренно щелочными. Щелочные сиениты недосыщены кремнеземом и относятся к оливин-нормативным породам. Для них характерно высокое содержание Nb (80—213 г/т) и низкое содержание Ta (4—9 г/т).

Щелочные кварцевые сиениты 2-й фазы представлены розовато-серыми до светло-розовых средне-крупнозернистыми породами с массивной, реже порфировидной структурой. Они состоят из калиевого полевого шпата (45—55 %), альбита (25—30 %), кварца (5—10 %), арфведсонита (8—10 %) и биотита (3—5 %). Акцессорные минералы представлены флюоритом, цирконом и апатитом, а также бастнезитом, монацитом, пироксеном, единичными зернами колумбита. Зерна пироксена наблюдаются в интерстициях зерен калиевого полевого шпата, иногда в виде включений в кварце.

Щелочные сиениты являются высоко железистыми породами (Fe# 74—78 %) калий-натровой щелочной серии (n 46—52 %). По содержанию SiO_2 (63—64 мас. %) они относятся к группе средних пород, по содержанию суммы щелочей $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (12—14 мас. %) являются умеренно щелочными. Породы пересыщены кремнеземом и относятся к кварц-нормативному ряду. Для щелочных кварцевых сиенитов, также как и для пород 1-й фазы, характерно высокое содержание Nb (210—222 г/т) и низкое содержание Ta (11—14 г/т).

¹ Fe# = $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$, $n = 100 \cdot \text{Na}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, атм. % — тип щелочности по (Дубровский, 2002).

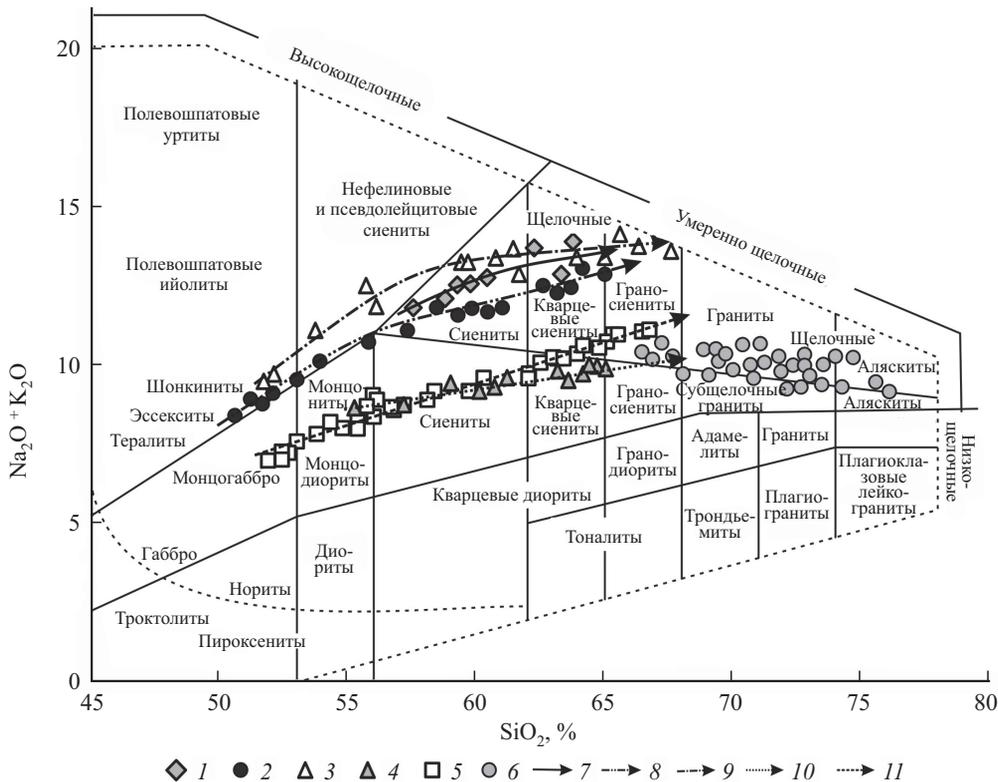


Рис. 2. Диаграмма TAS для архейских щелочных пород Кольской щелочной провинции.

1—3 — формация щелочных габбро—нефелиновых сиенитов—щелочных сиенитов—щелочных кварцевых сиенитов (данные автора): 1 — Низьяврский массив, 2 — Панэярский массив, 3 — Чагвеуайский массив; 4—5 — шошонитовая формация (данные автора): 4 — Иоканьский массив, 5 — Островной массив; 6 — формация щелочных граносиенитов — гранитов Кейв (Батнева, 1976); 7—11 — тренды дифференциации: 7 — Низьяврского массива, 8 — Панэярского массива, 9 — Чагвеуайского массива, 10 — Иоканьского массива, 11 — Островного массива.

Fig. 2. TAS diagram for Archean alkaline rocks of the Kola alkaline province.

На диаграмме TAS (рис. 2) фигуративные точки составов пород массива образуют единый тренд с конечными дифференциатами Чагвеуайского и Панэярского массивов, отличающийся от трендов пород шошонитовой формации и щелочных гранитов Кейв.

ДАнные ИЗОТопно-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для геохронологических исследований из щелочных кварцевых сиенитов была отобрана геохронологическая проба НМ-3/99. Результаты U-Pb датирования приведены в табл. 2. Изохронный U-Pb возраст циркона из щелочного кварцевого сиенита 2-й фазы составил 2656 ± 3 млн лет (рис. 3). Полученный возраст хорошо согласуется с ранее полученными возрастaми для пород формации щелочных габбро—нефелиновых сиенитов—щелочных сиенитов—щелочных кварцевых сиенитов, выделенной среди неархейских щелочных пород Центрально-Кольского и Мурманского блоков (Петровский и др., 2009; Чащин, Баянова, 2013; Петровский, Петровская, 2017, 2018)

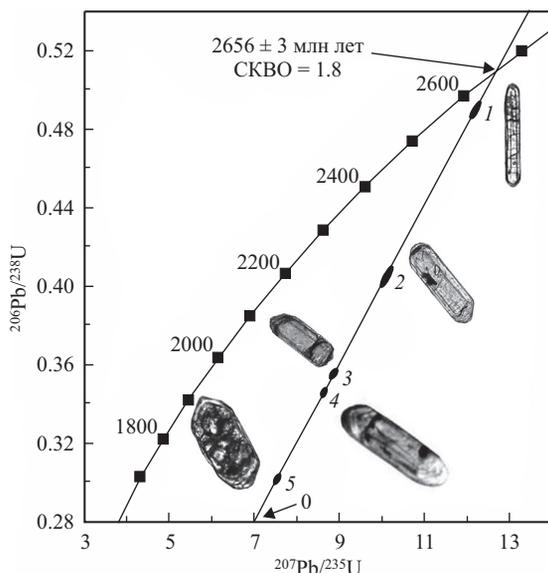


Рис. 3. Изотопная U-Pb диаграмма с конкордией для циркона из щелочных кварцевых сиенитов Низьяврского массива (проба НМ-3/99).

Fig. 3. Isotope U-Pb diagram with concordia for zircon from alkaline quartz syenites of the Niz'yavrski massif (sample NM-3/99).

Проведенные Sm-Nd и Rb-Sr изотопные исследования пород Низьяврского массива показали, что их модельные Sm-Nd возрасты равны $t_{DM} = 2.80—3.03$ млрд лет (табл. 2) и близки к модельным возрастам архейских щелочных серий Фенноскандинавского щита и Гренландии (Баянова, 2004; Зозуля и др., 2007; Петровский и др., 2009; Петровская, 2018). Первичное отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для всех изученных пород варьирует в пределах 0.70146—0.70391 в щелочных сиенитах и 0.70308—0.70348 в щелочных кварцевых сиенитах, что указывает на мантийное происхождение пород Низьяврского массива и минимальное участие корового материала в их образовании.

Таблица 2

Результаты U-Pb изотопных исследований циркона из кварцевых щелочных сиенитов Низьяврского массива

Results of U-Pb isotope studies of zircon from quartz alkali syenites of the Niz'yavrski massif

№ фракции	Навеска (мг)	Содержание, ppm		Изотопный состав свинца ¹			Изотопные отношения и возраст, млн лет ²			Rho
		Pb	U	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{207}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	
1	0.20	27.4	44.1	497	4.8747	4.4682	12.1878	0.48966	2658	0.95
2	0.30	75.1	143.5	409	4.7515	4.3435	10.1311	0.40698	2658	0.84
3	0.30	51.4	111.1	395	4.7274	4.0399	8.8432	0.35513	2658	0.86
4	0.30	78.5	181.8	480	4.8981	4.8737	8.6012	0.34520	2660	0.92
5	0.30	72.7	232.4	950	5.1474	4.9132	7.5218	0.30070	2666	0.93

Примечание. ¹ — все отношения скорректированы на холодное загрязнение 0.08 нг для Pb и 0.04 нг для U и масс-дискриминацию $0.12 \pm 0.04\%$. ² — коррекция на примесь обыкновенного свинца определена на возраст согласно модели Стейси—Крамерса (Stacey, Kramers, 1975).

Sm-Nd и Rb-Sr изотопные данные для пород Низьявского массива
Sm-Nd and Rb-Sr isotopic data for rocks of the Niz'yavski massif

Номер образца	Содержание, ppm				Изотопные отношения		Модельный возраст (млн лет)	$\epsilon_{Nd}(T)$ на 2656 млн лет	Изотопные отношения		$I_{Sr}(T)$ на 2656 млн лет
	Sm	Nd	Rb	Sr	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$			$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	
HM-1/99	9.83	63.87	127.61	153.52	0.092995	0.510799 ± 12	2953	-0.43	0.045224	0.70483 ± 14	0.70308
HM-2/99	2.15	41.20	141.58	184.03	0.115861	0.511320 ± 11	2838	+1.94	0.037471	0.70491 ± 15	0.70348
HM-3/99	8.63	51.96	152.19	166.16	0.100386	0.511056 ± 16	2804	+2.08	0.064189	0.70583 ± 22	0.70336
HM-6/99	8.57	45.02	131.22	170.40	0.115021	0.511252 ± 7	2917	+0.89	0.063892	0.70391 ± 17	0.70146
HM-6-1/99	8.27	40.46	134.51	136.90	0.123596	0.511430 ± 11	2896	+1.43	0.055003	0.70446 ± 15	0.70235
HM-7/99	16.70	89.21	133.40	140.30	0.113132	0.511137 ± 15	3035	-1.02	0.013978	0.70336 ± 14	0.70272
HM-8/99	9.52	48.61	148.49	171.34	0.118326	0.511300 ± 8	2942	+0.69	0.058422	0.70431 ± 16	0.70206
HM-12/99	4.83	30.89	182.92	160.04	0.101481	0.511046 ± 14	2844	+1.50	0.016574	0.70457 ± 17	0.70391

Примечание. HM-1/99-HM-3/99 — щелочные кварцевые слениты; HM-6/99-HM-12/99 — щелочные слениты. Модельный возраст рассчитан по отношению к децетированной мантии с возрастом 4.55 млрд лет и современными параметрами резервуара (CHUR) $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$ (DePaolo, 1981).

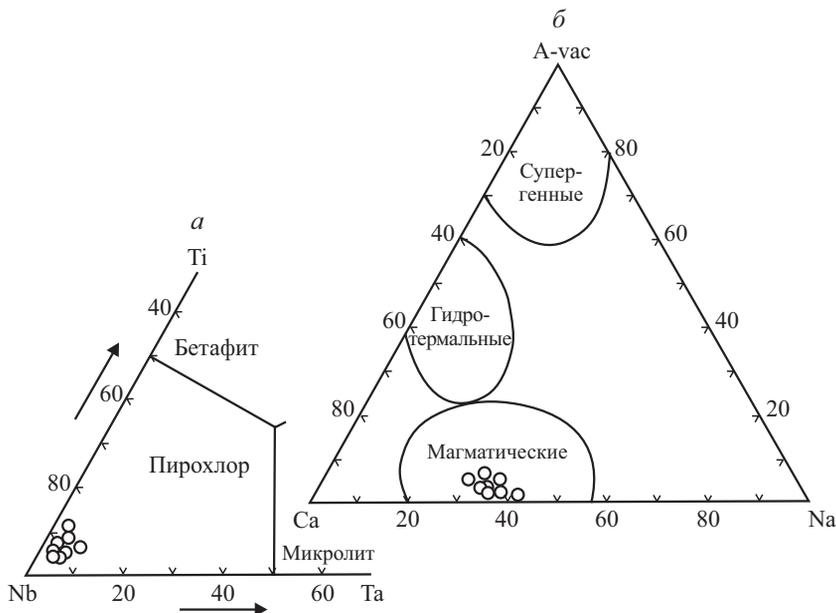


Рис. 4. Составы пирохлора из пород Низьяврского массива на классификационных диаграммах (*a* — Hogarth, 1977; *б* — Nasraoui, Bilal, 2000). A-vac — вакансия в позиции Ca.

Fig. 4. Compositions of pyrochlore from rocks of the Niz'yavr massif on the classification diagrams: *a* — according to (Hogarth, 1977); *б* — according to (Nasraoui, Bilal, 2000).

РЕДКОМЕТАЛЛЬНОЕ ОРУДЕНЕНИЕ

Пирохлор в изученных породах является главным минералом-концентратом Nb, его содержание в щелочных сиенитах достигает 0.5—0.7 %, в щелочных кварцевых сиенитах — 1.5 %. Он образует бледно-желтые, реже темно-коричневые зерна размером от 0.1 до 2 мм. Форма кристаллов различна, но наиболее развиты кристаллы октаэдрического облика с зональным строением.

Представительные анализы пирохлора приведены в табл. 3. На классификационной диаграмме Nb—Ti—Ta (Hogarth, 1977) его составы попадают в поле пирохлора (рис. 4, *a*). На классификационной диаграмме Ca—Na—A-vac (рис. 4, *б*; A-vac — вакансия в позиции Ca) фигуративные точки пирохлора располагаются в поле магматических составов (Nasraoui, Bilal, 2000).

В отличие от пирохлора, колумбит в изученных породах играет второстепенную роль. На электронном микроскопе было обнаружено всего лишь два зерна этого минерала, образующих кайму замещения в пирохлоре из щелочных кварцевых сиенитов. Колумбит, как и пирохлор, характеризуется низким содержанием тантала (табл. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Высокое содержание Nd в изученных породах (от 41 до 90 ppm, табл. 2, 3) позволяет говорить о низком загрязнении Sm-Nd изотопной системы веществом вмещающих пород (Nd 0.54—1.96 ppm; Кудряшов и др., 2013).

Химические составы пирохлора и колумбита (мас. %) из пород Низьяврского массива
 Chemical composition pyrochlore and columbite (wt %) from rocks of the Niz'yavrski massif

Компо- нент	Пирохлор								Колумбит	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nb ₂ O ₅	60.67	61.42	62.96	65.11	64.03	65.25	62.03	63.18	75.85	76.05
Ta ₂ O ₅	3.21	3.56	4.14	3.17	2.21	2.40	4.98	3.13	4.37	3.40
SiO ₂	0.12	0.09	—	—	0.02	—	0.09	—	—	—
TiO ₂	4.48	3.87	2.79	2.31	3.04	2.93	3.38	2.66	2.15	2.54
ThO ₂	0.23	0.31	0.21	0.33	0.15	0.15	0.19	0.18	—	—
UO ₂	0.66	0.62	0.69	0.54	0.18	0.12	1.52	0.45	—	—
PbO	0.30	0.15	0.48	0.23	—	—	0.32	0.04	—	—
CaO	19.08	17.99	17.63	17.08	18.54	19.08	17.44	18.47	—	—
BaO	0.15	0.13	0.08	—	0.12	—	—	0.08	—	—
SrO	0.71	1.12	1.32	0.56	0.39	0.58	1.40	1.01	—	—
FeO	0.08	0.05	0.11	0.08	0.45	0.08	0.05	0.11	14.53	12.77
MnO	—	—	—	—	—	—	—	—	3.08	5.15
Na ₂ O	4.91	5.63	6.02	6.44	5.23	5.87	5.96	5.82	—	—
K ₂ O	0.02	0.02	—	—	—	—	0.01	0.02	—	—
Al ₂ O ₃	—	—	—	—	0.10	—	—	—	—	—
Y ₂ O ₃	0.07	0.02	0.14	0.02	0.17	0.05	0.07	0.05	—	—
La ₂ O ₃	1.17	1.35	0.27	0.61	0.64	0.41	0.46	0.88	—	—
Ce ₂ O ₃	1.54	1.55	0.54	0.65	0.73	0.36	0.48	0.70	—	—
Pr ₂ O ₃	0.23	0.20	—	—	—	—	—	0.09	—	—
Nd ₂ O ₃	0.74	0.75	—	—	—	—	—	0.05	—	—
F	1.54	1.10	1.21	1.22	2.78	2.43	1.14	2.06	—	—
Сумма	99.91	99.93	98.59	98.35	98.78	99.71	99.52	98.98	99.98	99.91
Коэффициенты в формуле (пирохлор O = 7, колумбит O = 6)										
Nb	1.731	1.777	1.833	1.887	1.776	1.802	1.799	1.793	1.928	1.926
Ta	0.055	0.062	0.073	0.055	0.037	0.040	0.087	0.053	0.067	0.052
Si	0.008	0.006	—	—	0.001	—	0.006	—	—	—
Ti	0.213	0.186	0.135	0.111	0.140	0.135	0.163	0.126	0.091	0.107
Th	0.003	0.005	0.003	0.005	0.002	0.002	0.003	0.003	—	—
U	0.009	0.009	0.010	0.008	0.002	0.002	0.022	0.006	—	—
Pb	0.005	0.003	0.008	0.004	—	—	0.006	0.001	—	—
Ca	1.290	1.233	1.216	1.173	1.219	1.249	1.199	1.243	—	—
Ba	0.004	0.003	0.002	—	0.003	—	—	0.002	—	—
Sr	0.026	0.042	0.049	0.021	0.014	0.021	0.052	0.037	—	—
Mn	—	—	—	—	—	—	—	—	0.147	0.244
Fe	0.004	0.003	0.006	0.004	0.023	0.004	0.003	0.006	0.683	0.598
Na	0.601	0.699	0.752	0.801	0.622	0.695	0.741	0.709	—	—
K	0.002	0.002	—	—	—	—	0.001	0.002	—	—
Al	—	—	—	—	0.007	—	—	—	—	—
Y	0.002	0.001	0.005	0.001	0.006	0.002	0.002	0.002	—	—
La	0.027	0.032	0.006	0.014	0.014	0.009	0.011	0.020	—	—
Ce	0.036	0.036	0.013	0.015	0.016	0.008	0.011	0.016	—	—
Pr	0.005	0.005	—	—	—	—	—	0.002	—	—
Nd	0.017	0.017	—	—	—	—	—	0.001	—	—
Сумма	4.038	4.121	4.111	4.099	3.882	3.969	4.106	4.022	2.916	2.927
F	0.307	0.223	0.246	0.247	0.540	0.469	0.231	0.409	—	—

Примечание. Анализы: 1—2 — образец НМ-6/99; 3—4 — образец НМ-7/99; 5—6 — образец НМ-12/99; 7 — образец НМ-1/99; 8—10 — образец НМ-3/99.

О низкой контаминации коровым материалом говорит и первичное изотопное отношение изотопов стронция. Основываясь на изотопном составе неодаима ($\epsilon_{Nd} = -1.02 \div +2.08$) и стронция ($I_{Sr}(T) = 0.70146—0.70391$) для пород Низъяврского массива, можно сделать вывод, что источником их расплавов могла являться мантия, близкая по составу BSE. Эти данные хорошо согласуются с результатами изотопных исследований щелочных массивов формации щелочных габбро—нефелиновых сиенитов—щелочных сиенитов—щелочных кварцевых сиенитов Центрально-Кольского и Мурманского блоков. В тоже время, по изотопным данным породы Низъяврского массива кардинально отличаются от неоархейских щелочных пород серии щелочное габбро—нефелиновый сиенит—щелочной сиенит Сахарйокского массива Кейв и щелочных гранитов Кейв, для которых предполагается мантийный источник типа EM II (Зозуля и др., 2007). Из всех известных архейских щелочных комплексов наиболее близки по изотопно-геохимическим характеристикам к породам Низъяврского массива карбонатитовый комплекс Сиилинярви из Восточной Финляндии и пироксенит—фоидолит—монцонит—щелочной сиенит—карбонатитовый комплекс Ськолдунген из Восточной Гренландии.

Формы выделения и состав пирохлора указывают на то, что он имеет магматическое происхождение. Изученный пирохлор отличается низким содержанием Si, U, Th, Pb, Fe, Ba, Sr, что отличает его от метасоматического пирохлора, развитого в палеопротерозойских и палеозойских щелочных комплексах Кольской провинции, а также пирохлора, связанного с неоархейским щелочно-гранитным комплексом Кейв (Волошин и др., 1981; Сорохтина и др., 2010; Baginski et al., 2016; MacDonald et al., 2017; и др.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Низъяврский щелочной массив представляет собой шток, имеющий двухфазное строение и сложенный щелочными сиенитами (1-я фаза) и щелочными кварцевыми сиенитами и комплиментарными им жильными образованиями (2-я фаза).

Массив сформировался в неоархее и имеет возраст 2656 ± 3 млн лет (данные датирования по щелочным кварцевым сиенитам).

По изотопно-геохимическим характеристикам породы массива имеют мантийное происхождение. Источником их расплавов, по-видимому, являлась мантия типа BSE. Эти данные хорошо согласуются с изотопными данными по другим щелочным массивам формации щелочных габбро—нефелиновых сиенитов—щелочных сиенитов—щелочных кварцевых сиенитов Центрально-Кольского и Мурманского блоков.

Породы Низъяврского массива характеризуются повышенным содержанием Nb и содержат пирохлор, что делает массив перспективным объектом для поисков Ta-Nb оруденения.

Работа выполнена в рамках темы НИР ГИ КНЦ РАН № 0226-2019-0053.

Автор выражает благодарность Т. Б. Баяновой и Д. В. Елизарову за помощь в проведении изотопно-геохимических исследований.

Список литературы

- Арзамасцев А. А., Федотов Ж. А., Арзамасцева Л. В. Дайковый магматизм северо-восточной части Балтийского щита. СПб.: Наука, **2009**. 383 с.
- Афанасьев Б. В. Минеральные ресурсы щелочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова. СПб.: Изд. Роза ветров, **2011**. 224 с.
- Батиева И. Д. Петрология щелочных гранитоидов Кольского полуострова. Л.: Наука, **1976**. 224 с.
- Баянова Т. Б. Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. СПб.: Наука, **2004**. 174 с.
- Волошин А. В., Буканов В. В., Полежаева Л. И. Пломбипрохлор и пломбобмикрولит из амазонитовых пегматитов Кольского полуострова // Минералогический журнал. **1981**. № 5. С. 20—34.
- Дубровский М. И. Комплексная классификация магматических горных пород. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, **2002**. 234 с.
- Зозуля Д. Р., Баянова Т. Б., Серов П. А. Возраст и изотопно-геохимические характеристики архейских карбонатитов и щелочных пород Балтийского щита // Докл. РАН. **2007**. Т. 415. № 3. С. 383—388.
- Кудряшов Н. М., Петровский М. Н., Мокрушин А. В. Неоархейский санукитоидный магматизм Кольского региона: геологические, петрохимические, геохронологические и изотопно-геохимические данные // Петрология. **2013**. Т. 21. № 4. С. 389—413.
- Мирская Д. Д. Щелочные граниты района оз. Низъявр // Щелочные граниты Кольского полуострова. М.; Л.: Изд. АН СССР, **1958**. С. 140—145.
- Петров В. П., Беляев О. А., Волошина З. М. и др. Эндогенные режимы метаморфизма раннего докембрия (северо-восточная часть Балтийского щита). Л.: Наука, **1990**. 184 с.
- Петровский М. Н. Низъяврский щелочной массив — формационная принадлежность // Труды Ферсмановской научн. сессии. **2019**. № 16 (в печати).
- Петровская М. Н., Митрофанов Ф. П., Петровская Л. С., Баянова Т. Б. Новый массив архейских щелочных сиенитов в Мурманском домене Кольского полуострова // Докл. РАН. **2009**. Т. 424. № 1. С. 89—93.
- Петровский М. Н., Петровская Л. С. Неоархейские интрузивные массивы шошонитовой серии в Кольской щелочной провинции: история изучения и геологическая характеристика // Труды Ферсмановской научн. сессии. **2017**. № 14. С. 150—155.
- Петровский М. Н., Петровская Л. С. Неоархейские щелочные породы Центрально-Кольского блока — массив Чагвеуайв: геология и возраст // ЗРМО. **2018**. № 1. С. 44—54.
- Сорохтина Н. В., Козарко Л. Н., Шпаченко А. К. Новые данные по минералогии и геохимии редкометалльного оруденения массива Гремяха-Вырмес // Докл. РАН. **2010**. Т. 434. № 2. С. 243—247.
- Чащин В. В., Баянова Т. Б. Геологическое положение и U-Pb возраст субщелочных сиенитов Кольского блока — Кольский п-ов, Россия // Геология и геохронология породообразующих и рудных процессов в кристаллических щитах. Апатиты: K&M, **2013**. С. 181—183.

References

- Afanas'yev B. V. Mineral resources of alkaline ultrabasic massifs of the Kola Peninsula. Saint Petersburg: Wind Rose Publ., **2011**. 224 p. (in Russian).
- Arzamastsev A. A., Fedotov G. A., Arzamastseva L. V. Dyke magmatism of the north-eastern part of the Baltic Shield. Saint Petersburg: Nauka, **2009**. 383 p. (in Russian).
- Bagiński B., Zozyla D., MacDonald R., Kartashov P., Dzierżanowski P. Low-temperature hydrothermal of a rare-metal rich quartz-epidote metasomatite from the El'ozero deposit, Kola Peninsula, Russia. *Europe J. Miner.* **2016**. Vol. 28. P. 789—810.
- Batieva I. D. Petrology of alkaline granitoids in the Kola Peninsula. Leningrad: Nauka, **1976**. 224 p. (in Russian).
- Bayanova T. B. Age of reference geological complex on the Kola Peninsula and duration of magmatic processes. Saint Petersburg: Nauka, **2004**. 176 p. (in Russian).
- Chashchin V. V., Bayanova T. B. Geological setting and U-Pb age of the subalkaline syenites Kola block — Kola Peninsula, Russia. In: *Geology and geochronology of the rock-forming and ore processes in crystalline shields*. Apatity: K&M, **2013**. P. 181—183 (in Russian).
- De Paolo D. J. A neodymium and strontium isotopic study of the Mesozoic calc-alkaline granite batholiths of the Sierra Nevada and Peninsular Ranges. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. **1981**. Vol. 8. Iss. B1. P. 10470—10488.

- Dubrovskiy M. I. A complex classification of magmatic rocks. Apatity: KSC RAS, **2002**. 234 p. (in Russian).
- Hogarth D. D. Classification and nomenclature of the pyrochlore group. *Amer. Miner.* **1977**. Vol. 62. P. 403—410.
- Kudryashov N. M., Petrovskiy M. N., Mokrushin A. V. Neoproterozoic sanukitoid magmatism of the Kola region: geological, petrochemical, geochronological, and isotope-geochemical data. *Petrology*. **2013**. Vol. 21. N 4. P. 389—413 (in Russian).
- Ludwig K. R. Isoplot/Ex — a geochronological toolkit for Microsoft Excel, Version 2.05. *Berkeley Geochronology Center Spec. Publ.* N 1a. **1999**. 49 p.
- MacDonald R., Baginski B., Zozyla D. Differing responses of zircon, chevkinite-(Ce), monacite-(Ce), and fergusonite-(Y) to hydrothermal alteration: Evidence from the Keivy alkaline province, Kola Peninsula, Russia. *Mineral. Petrol.* **2017**. Vol. 111. P. 523—545.
- Mirskaja D. D. Alkaline granitoids of the Lake Niz'yavr. In: *Alkaline granitoids of the Kola Peninsula*. Moscow, Leningrad: Academy Sci. USSR, **1958**. P. 140—145 (in Russian).
- Nasraoui M., Bilal E. Pyrochlores from the Lueshe carbonatite complex (Democratic Republic of Congo): a geochemical record of different alteration stages. *J. Asian Earth Sci.* **2000**. Vol. 18. N 2. P. 237—251.
- Petrov V. P., Belyaev O. A., Voloshina Z. M. et al. Endogenous regimes of metamorphism in the early Precambrian (north-eastern part of the Baltic shield). Leningrad: Nauka, **1990**. 184 p. (in Russian).
- Petrovskiy M. N. Niz'yavrskiy alkaline massif — formational affiliation. In: *Proc. Fersman Sci. Session*. **2019**. № 16 (in Russian) (in press).
- Petrovskiy M. N., Mitrofanov F. P., Petrovskaya L. S., Bayanova T. B. New massif of Archean alkaline syenites in the Murmansk Domain of the Kola Peninsula. *Doklady Earth Sci.* **2009**. Vol. 424. N 1. P. 89—93 (in Russian).
- Petrovskiy M. N., Petrovskaya L. S. Neoproterozoic intrusive massifs of the shoshonite series in the Kola alkaline province: history of exploration and geological characteristic. *Proc. Fersman Sci. Session*. **2017**. N 14. P. 150—155 (in Russian).
- Petrovskiy M. N., Petrovskaya L. S. Neoproterozoic alkaline rocks of the Central-Kola block — the Chagveuave massif: geology and age. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2018**. N 1. P. 44—54.
- Sorokhtina N. V., Kogarko L. N., Shpachenko A. K. New data on mineralogy and geochemistry of rare-metal mineralization of the Gremiakha-Vyrmes massif. *Doklady Earth Sci.* **2010**. Vol. 434. N 1. P. 1240—1244.
- Stacey J. S., Kramers J. D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.* **1975**. Vol. 26. N 2. P. 207—221.
- Steiger R. H., Jäger E. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.* **1977**. Vol. 36. N 3. P. 359—362.
- Voloshin A. V., Bukanov V. V., Polezhaeva L. I. Plumbopirokhlore and plumbomicrolite from amazonitic pegmatites of the Kola Peninsula. *Miner. J.* **1981**. N 5. P. 20—34 (in Russian).
- Zozulya D. R., Bayanova T. B., Serov P. A. Age and isotopic characteristics of the Archean carbonatites and alkaline rocks in the Baltic Shield. *Doklady Earth Sci.* **2007**. Vol. 415. N 3. P. 383—388 (in Russian).

Поступила в редакцию
12 марта 2019 г.