
МИНЕРАЛЫ И МИНЕРАЛЬНЫЕ ПАРАГЕНЕЗИСЫ

РЕДКОЗЕМЕЛЬНО–ТОРИЙ–НИОБИЕВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ЩЕЛОЧНЫХ АЛЬБИТОВЫХ СИЕНИТАХ ПАНЭЯВРСКОГО МАССИВА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

© 2022 г. Д. чл. М. Н. Петровский*

*Геологический институт КНЦ РАН,
ул. Ферсмана, 14, Апатиты, Мурманская область, 184209 Россия
e-mail: petrovskiy@geoksc.apatity.ru

Поступила в редакцию 28.07.2022 г.

После доработки 23.08.2022 г.

Принята к публикации 12.10.2022 г.

Статья посвящена первым результатам геохимического и минералогического изучения рудной минерализации пород неогарнейского Панэяврскогo щелочного массива. Главная фаза массива представлена щелочными альбитовыми сиенитами, которые характеризуются повышенными содержаниями LREE (6420 г/т), ΣREE (6710 г/т), Nb (880 г/т), Th (485 г/т), U (87 г/т). Установлено, что редкие металлы сконцентрированы в пирохлоре, монаците, торите и чевкините-(Ce). Полученные данные увеличивают перспективы редкометалльного оруденения Мурманского неогарнейского кратона.

Ключевые слова: сиениты, пирохлор, монацит, торит, чевкинит-(Ce), неогарней, Кольская щелочная провинция

DOI: 10.31857/S0869605522060041

Современная промышленность не может обойтись без редкоземельных элементов (REE). Эти элементы часто называют “зелеными металлами” вследствие их определяющей роли при производстве ветровых электрогенераторов, электромобилей, автомобильных и промышленных катализаторов, препятствующих токсичным выбросам в атмосферу, энергосберегающих источников света и других высоко-экологичных продуктов. Поэтому не удивительно, что на протяжении последних десятилетий наблюдается устойчивый рост рыночных потребностей в этом сырье. Российская промышленность основной объем своих потребностей в редкоземельных элементах удовлетворяет за счет импорта концентрата REE из Китая. В связи с этим достаточно очевидна необходимость развития собственного ресурсного потенциала REE, и не только за счет известных месторождений, но и за счет малоизученных объектов. Таким объектом может служить и Панэяврский щелочной массив, открытый автором в 2004 г. (Петровский и др., 2009). Массив сложен щелочными габбро, щелочными альбит-ортоклазовыми и альбитовыми сиенитами. Он относится к неогарнейской серии щелочных габбро – нефелиновых сиенитов – щелочных сиенитов – щелочных кварцевых сиенитов (Петровский, Петровская, 2017; Петровский, 2019).

Щелочные альбитовые сиениты содержат минералы ниобия, тория, редкоземельных элементов. Их содержания достигают нескольких процентов (например, содержание пирохлора – 2%, монацита – 1%). Наибольшие содержания редких элементов составляют (мас. %): REE 0.67, Nb 0.1, Th 0.05. В связи с этим изучение Панэяврскогo

массива имеет важное значение для уточнения редкометального ресурсного потенциала Кольской щелочной провинции.

В настоящей статье приводятся новые данные о геохимических особенностях пород массива и дается характеристика редкометальной REE-Th-Nb минерализации.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследований послужила коллекция образцов, отобранных автором при проведении полевого геологического изучения Панэярвского массива в 2004 г. Химический состав пород определялся методом классического количественного анализа в химико-аналитической лаборатории ГИ КНЦ РАН (аналитик Л.И. Константинова). Содержания редких и рассеянных элементов определялось ICP-MS методом в лаборатории спектрометрических методов анализа ИХТРЭМС КНЦ РАН (аналитик Елизарова И.В.). Минеральный состав пород изучался с помощью оптического микроскопа AxioPlan. Состав минералов – при помощи сканирующего электронного микроскопа LEO-1450 с энергодисперсным спектрометром Röntec и электронно-зондового микроанализатора Cameca MS-46 (аналитик А.В. Базай) в лаборатории физических методов ГИ КНЦ РАН.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МАССИВА

Панэярвский массив, как Низэярвский щелочной массив (Петровский, 2019), располагается в пределах Иоканьгского блока Мурманского неоархейского кратона. Его размещение контролируется узлом пересечения разломов субширотного, северо-западного и северо-восточного простираний. На современном эрозионном срезе массив представляет собой изометричный шток, сложенный двумя интрузивными фазами, контрастными по своему петрографическому составу (рис. 1). Размеры штока в плане составляют 0.85×1.5 км. Южная часть массива сложена щелочными альбит-ортотлазовыми сиенитами 2-й интрузивной фазы, основная часть массива – щелочными мезократовыми альбитовыми сиенитами 3-й интрузивной фазы. Альбитовые сиениты на контакте с вмещающими плагиогранитами, в узкой зоне (2–3 м), иногда обогащаются кварцем и приобретают лейкократовый облик. Ранняя (условно 1-я) фаза массива представлена ксенолитами щелочных габбро, обнаруженных в сиенитах 2-й и 3-й фаз.

Возраст формирования массива определен U-Pb методом по циркону из альбитовых сиенитов. Он равен 2653 ± 9 млн лет (Петровский и др., 2009) и соответствует возрасту других массивов неоархейской формации щелочных габбро – нефелиновых сиенитов – щелочных сиенитов – щелочных кварцевых сиенитов Кольского полуострова: Чагвеуайвского (2667 ± 4 – 2601 ± 12 млн лет; Петровский, Петровская, 2018), Низэярвского (2656 ± 3 млн лет; Петровский, 2019), Репъявр-Поркозерского (2668 ± 7 млн лет; Чашин, Баянова, 2013). Расположенный севернее него Островной щелочной массив шошонитовой серии (рис. 1), имеет более древний возраст, равный 2.73–2.72 млрд лет (Петровский, Петровская, 2009, 2017).

Вмещающими породами для Панэярвского массива служат позднеархейские мигматизированные плагиограниты с возрастом 2.75 млрд лет (Козлов и др., 2006). Породы массива обладают автономными внутренними структурами, несогласными со структурой вмещающих пород. В отличие от массивных сиенитов 2-й фазы, альбитовые сиениты 3-й фазы имеют линейно-плоскостную ориентировку крупных таблитчатых кристаллов альбита и игольчатых кристаллов клинопироксена и амфибола, субсогласную с плоскостью контакта. Контакты массива с вмещающими породами резкие, секущие с крутым и субвертикальным положением контактовых поверхностей, срезающих гнейсовидность и мигматитовую полосчатость плагиогранитов. Во вмещающих породах наблюдаются жилы альбитовых сиенитов. Сами породы массива секутся дайкой пойкилофитовых долеритов с возрастом 1908 ± 60 млн лет (Арзамасцев и др., 2009).

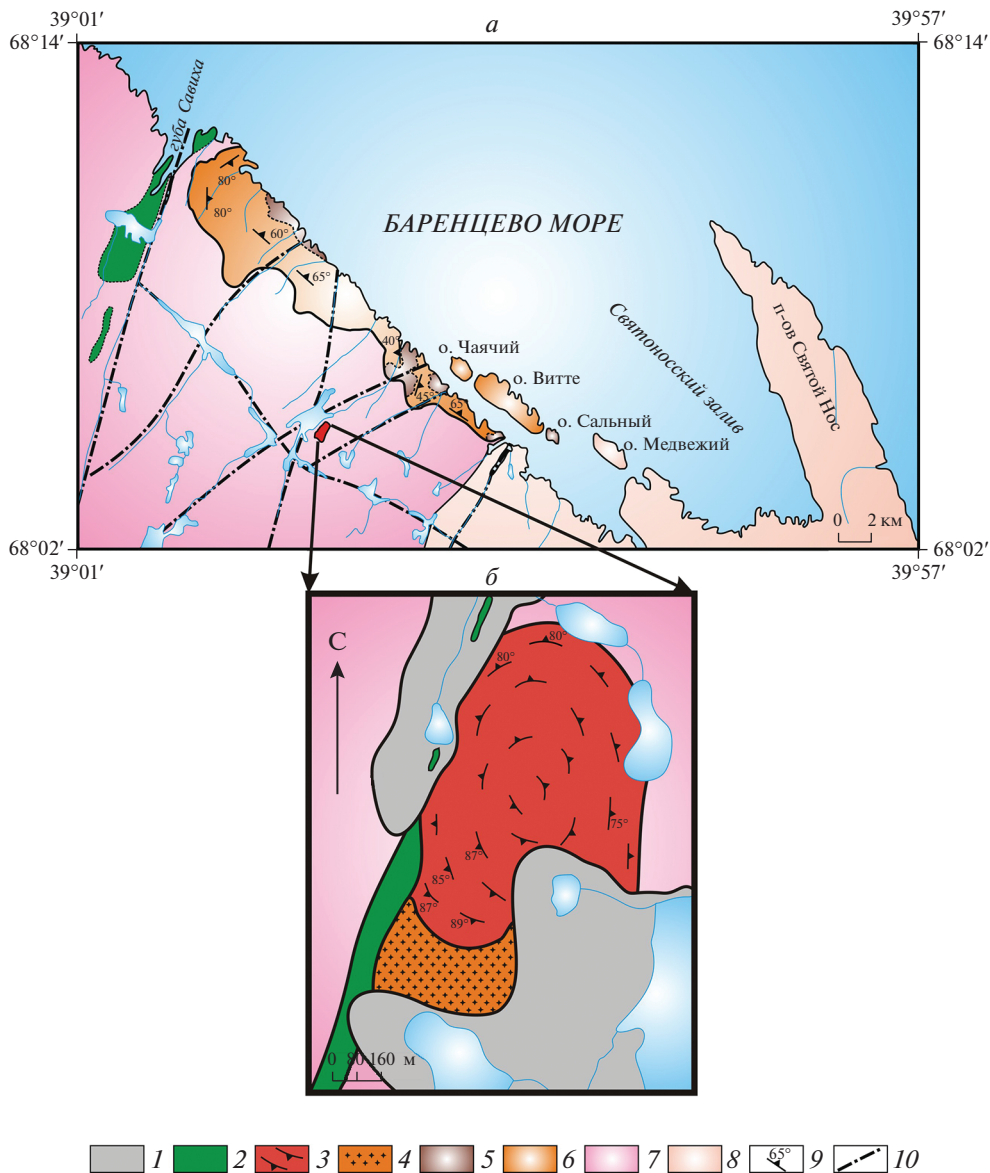


Рис. 1. Схемы размещения (а) и геологического строения (б) Панэяврского массива.

1 – четвертичные отложения; 2 – раннепротерозойские долериты; 3–4 – Панэяврский массив: щелочные альбитовые сиениты и альбитовые кварцевые сиениты 3-й фазы (3), субщелочные альбит-ортоклазовые сиениты 2-й фазы (4); 5–6 – Островной массив: щелочные кварцевые сиениты 2-й фазы (5), нерасчлененные субщелочные монцогаббро, монзониты и кварцевые монзониты 1-й фазы (6); 7 – мигматизированные плагиограниты; 8 – гранитоиды ТТГ-формации; 9 – элементы залегания трахитоидности; 10 – разломы.

Fig. 1. Scheme of location (a) and geological map (b) of the Panejavr massif.

1 – Quaternary deposits; 2 – Early Proterozoic dolerites; 3–4 – Panejavr massif: alkaline albite syenites and albite quartz syenites of the 3rd phase (3), subalkaline albite-orthoclase syenites of the 2nd phase (4); 5–6 – Ostrovnoy massif: alkaline quartz syenites of the 2nd phase (5), undivided subalkaline monzogabbro, monzonites and quartz monzonites of the 1st phase (6); 7 – migmatized plagiogranites; 8 – TTG-formation granitoids; 9 – elements of trachytoid structure; 10 – faults.

ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Щелочные габбро (эссекситы) на современном эрозионном срезе массива наблюдаются только в виде ксенолитов, встречающихся как в альбит-ортоклазовых, так и в альбитовых сиенитах. Они представляют собой темно-зеленые, почти до черных, массивные среднезернистые породы. Минеральный состав (об. %): клинопироксен (омфациит) 33–51, амфибол (магнезиогастингисит) 5–10, биотит 3–6, олигоклаз-андезин 22–27, ортоклаз 11–23, нефелин + натролит 4–9, апатит 0.5–2.5, титаномагнетит 1–2, бадделеит <1.

Щелочные альбит-ортоклазовые сиениты представляют собой равномерно-зернистые, среднезернистые породы с массивной текстурой серого и темно-серого цвета. Структура пород гипидиоморфнозернистая или аллотриоморфнозернистая. Минеральный состав (об. %): клинопироксен изменяющегося состава (от авгита в ядерных частях зерен до эгирин-авгита в краевых частях) 4–6, биотит 9–12, ортоклаз 57–61, альбит 21–25, кварц 0–2. Содержание апатита в этих породах достигает 1%, циркона – 3%, титаномагнетита – 2%, титанита – 3%. Отмечаются единичные зерна алланита.

Щелочные альбитовые сиениты представляют собой мезократовые породы интрузивного облика зеленовато-серого с розоватым оттенком цвета. Имеют крупно-среднезернистую, порфириовидную структуру и трахитоидную текстуру. Порфириовые вкрапленники представлены амфиболом. Структура основной массы гипидиоморфнозернистая, в зонах развития сахаровидного альбита – гранобластовая. В основной массе наблюдаются идиоморфные, часто ориентированные таблитчатые зерна альбита, между которыми развиты кварц, темноцветные и акцессорные минералы. Минеральный состав (об. %): клинопироксен (в крупных зернах варьирующий от эгирин-авгита в ядерных частях до эгирина в краевых частях, а в мелких игольчатых зернах представленный только эгирином) 2–5, амфибол (катофорит) 10–28, альбит и альбит-антипертит 60–68. Содержание кварца варьирует от единичных зерен до 4%, в приконтактных разновидностях достигает 7.5–8%. Содержание ильменита поднимается до 2%, циркона – 1%, апатита – 1.5%, пирохлора – 2%, монацита – 1%. Количество торита и чевкинита-Se не превышает 0.1%.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРОД

Данные о химическом составе пород Панэяврского массива приведены в табл. 1. Петрохимически щелочные габбро являются низко-железистыми породами ($Fe\# = 32–45$ ат. %), калий-натровой щелочной серии ($n = 54–63$ ат. %) ¹. На высокую щелочность пород указывают: высокое содержание суммы Na_2O и K_2O (6–9 мас. %), коэффициент апаитности пород равный 0.77–0.98, недонасыщенность кремнеземом (породы содержат нормативный и модалный нефелин). На классификационной диаграмме TAS фигуративные точки составов щелочных габбро располагаются в областях щелочных габбро и монцонитов (рис. 2).

Для щелочных альбит-ортоклазовых сиенитов характерны: высокий коэффициент апаитности ($K_{апп} = 0.89–0.99$) и умеренная железистость ($Fe\# = 52–57$ ат. %). По соотношению щелочей они относятся к щелочной K-Na серии ($n = 37–46$ ат. %), по насыщенности кремнеземом – к оливин-нормативной группе. На классификационной диаграмме TAS фигуративные точки составов альбит-ортоклазовых сиенитов, большей частью, располагаются в области щелочных сиенитов (рис. 2).

Щелочные альбитовые сиениты характеризуются высокими: железистостью ($Fe\# = 72–80$ ат. %) и щелочностью ($K_{апп} = 1.14–1.53$). Они относятся к щелочной натровой серии ($n = 83–90$ ат. %), а по насыщенности кремнеземом отвечают кварц-нормативной группе. На классификационной диаграмме TAS фигуративные точки составов по-

¹ $n = 100Na_2O/(Na_2O + K_2O)$ – тип щелочности по: Дубровский, 2002.

Таблица 1. Содержания петрогенных (мас. %) и редких (г/т) элементов в породах Панэяврского массива**Table 1.** Content of major (wt %) and trace (ppm) elements in rocks of the Panejavr massif

Ком- понент	Образцы											
	120/04	122/04	123/04	123- 1/04	123- 2/04	123- 3/04	123- 4/04	115/04	117/04	118/04	128- 3/04	128- 4/04
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	49.51	48.72	48.67	49.20	49.26	48.35	53.81	57.83	56.69	58.36	59.05	57.67
TiO ₂	1.48	2.03	2.27	1.97	1.90	3.29	3.02	1.04	1.18	1.12	0.65	0.94
Al ₂ O ₃	9.44	10.26	10.90	10.98	10.15	11.62	11.43	15.40	13.70	15.05	14.00	13.95
Fe ₂ O ₃	2.64	4.43	4.11	3.76	3.77	4.64	3.01	3.11	2.68	3.02	2.32	2.71
FeO	8.80	6.51	6.59	6.26	7.22	7.18	7.84	3.79	6.09	3.87	5.18	5.66
MnO	0.19	0.15	0.18	0.20	0.20	0.14	0.12	0.12	0.15	0.15	0.13	0.17
MgO	12.98	10.65	10.79	11.19	12.13	7.53	8.13	3.16	4.07	3.09	3.65	3.40
CaO	6.89	8.68	6.95	7.48	6.88	8.64	8.71	3.58	4.12	3.13	3.10	3.23
Na ₂ O	2.92	3.16	3.80	2.74	2.71	3.45	3.27	3.92	3.18	4.15	3.07	3.75
K ₂ O	3.24	2.76	2.89	3.55	3.59	3.06	3.09	6.77	6.95	6.84	7.74	7.09
P ₂ O ₅	0.17	0.18	0.24	0.15	0.23	0.40	0.38	0.23	0.17	0.25	0.19	0.20
S	0.05	0.08	0.03	0.08	0.04	0.04	0.06	0.08	0.10	0.08	0.08	0.06
F	0.13	0.05	0.17	0.14	0.13	0.05	0.02	0.09	0.09	0.07	0.10	0.09
H ₂ O ⁻	0.21	0.58	0.56	0.54	0.28	0.29	0.21	0.30	0.27	0.28	0.32	0.38
H ₂ O ⁺	1.26	1.71	1.76	1.69	1.48	1.22	0.55	0.50	0.53	0.53	0.40	0.41
Сумма	99.91	99.95	99.91	99.93	99.97	99.90	99.99	99.92	99.97	99.99	99.98	99.96
Rb	—	264	—	—	—	—	221	—	597	—	710	—
Ba	—	1357	—	—	—	—	1850	—	2135	—	1810	—
Sr	—	715	—	—	—	—	1686	—	105	—	729	—
Ta	—	2.03	—	—	—	—	2.01	—	0.04	—	0.43	—
Nb	—	46	—	—	—	—	61	—	16	—	17	—
Hf	—	11.4	—	—	—	—	20.6	—	58	—	47	—
Zr	—	388	—	—	—	—	443	—	1291	—	2004	—
Y	—	19	—	—	—	—	30	—	50	—	26	—
Th	—	4.9	—	—	—	—	5.2	—	6.2	—	9.3	—
U	—	8.5	—	—	—	—	9.0	—	14	—	15	—
La	—	52	—	—	—	—	67	—	115	—	331	—
Ce	—	127	—	—	—	—	164	—	172	—	424	—
Pr	—	16	—	—	—	—	30	—	23	—	27	—
Nd	—	60	—	—	—	—	81	—	91	—	84	—
Sm	—	11	—	—	—	—	15	—	15	—	18	—
Eu	—	2.29	—	—	—	—	3.26	—	3.65	—	7.34	—
Gd	—	8.71	—	—	—	—	9.63	—	13.41	—	11.62	—
Tb	—	2.91	—	—	—	—	2.81	—	1.53	—	1.44	—
Dy	—	4.7	—	—	—	—	8.1	—	8.14	—	9.62	—
Ho	—	1.86	—	—	—	—	2.16	—	1.42	—	2.19	—
Er	—	2.9	—	—	—	—	5.4	—	3.8	—	6.3	—
Tm	—	0.4	—	—	—	—	1.1	—	0.5	—	0.8	—
Yb	—	2.5	—	—	—	—	5.0	—	3.1	—	5.3	—
Lu	—	0.46	—	—	—	—	0.91	—	0.47	—	0.77	—

Таблица 1. Окончание

Компонент	Образцы										
	129/04	119/04	124/04	124-2/04	125/04	125-1/04	126-1/04	126-2/04	126-3/04	126-4/04	127-1/04
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
SiO ₂	58.15	60.83	62.39	62.43	64.91	59.83	61.61	61.03	61.07	62.08	60.41
TiO ₂	0.88	1.12	0.87	0.86	0.73	1.48	0.94	0.79	0.93	0.84	1.91
Al ₂ O ₃	13.92	13.08	14.02	13.54	12.42	12.97	13.59	13.25	12.39	12.13	12.94
Fe ₂ O ₃	2.44	4.14	3.40	2.54	3.24	4.90	3.45	2.27	3.60	3.71	3.55
FeO	5.50	3.95	2.86	4.68	2.55	3.64	3.33	5.02	4.22	4.32	4.22
MnO	0.05	0.05	0.02	0.14	0.04	0.10	0.03	0.03	0.13	0.14	0.08
MgO	4.03	1.38	1.16	1.19	1.01	1.19	1.27	1.30	1.59	1.07	1.02
CaO	3.08	3.30	2.91	2.40	2.00	3.41	2.73	3.21	2.58	2.52	2.53
Na ₂ O	2.88	8.81	8.16	8.41	9.96	8.43	9.31	8.97	9.31	9.88	8.65
K ₂ O	7.84	1.85	2.37	2.43	1.77	2.50	2.52	2.58	2.44	2.14	2.78
P ₂ O ₅	0.15	0.26	0.05	0.04	0.10	0.29	0.07	0.22	0.06	0.06	0.05
S	0.10	0.02	0.06	0.07	0.06	0.07	0.11	0.03	0.02	0.06	0.08
F	0.06	0.44	1.01	0.83	0.51	0.45	0.46	0.57	1.08	0.53	1.00
H ₂ O ⁻	0.32	0.28	0.30	0.12	0.24	0.37	0.16	0.28	0.16	0.22	0.36
H ₂ O ⁺	0.56	0.34	0.50	0.30	0.41	0.34	0.39	0.38	0.36	0.27	0.58
Сумма	99.96	99.95	100.08	99.98	99.95	99.97	99.97	99.93	99.94	99.97	100.16
Rb	—	—	173	—	—	—	—	—	118	—	189
Ba	—	—	810	—	—	—	—	—	684	—	525
Sr	—	—	3708	—	—	—	—	—	4352	—	3701
Ta	—	—	4.72	—	—	—	—	—	5.59	—	5.31
Nb	—	—	583	—	—	—	—	—	882	—	710
Hf	—	—	78	—	—	—	—	—	91	—	63
Zr	—	—	945	—	—	—	—	—	987	—	932
Y	—	—	557	—	—	—	—	—	470	—	410
Th	—	—	458	—	—	—	—	—	404	—	485
U	—	—	85	—	—	—	—	—	77	—	87
La	—	—	1400	—	—	—	—	—	1601	—	1295
Ce	—	—	1872	—	—	—	—	—	2735	—	1308
Pr	—	—	154	—	—	—	—	—	355	—	320
Nd	—	—	1274	—	—	—	—	—	1632	—	1579
Sm	—	—	71	—	—	—	—	—	74	—	72
Eu	—	—	16.43	—	—	—	—	—	19.47	—	19.53
Gd	—	—	84.16	—	—	—	—	—	78.52	—	80.96
Tb	—	—	11.95	—	—	—	—	—	22.27	—	21.22
Dy	—	—	73.1	—	—	—	—	—	80.9	—	80.4
Ho	—	—	14.73	—	—	—	—	—	19.55	—	18.97
Er	—	—	46.3	—	—	—	—	—	35.8	—	35.2
Tm	—	—	7.4	—	—	—	—	—	13.7	—	10.9
Yb	—	—	52.3	—	—	—	—	—	38.1	—	34.5
Lu	—	—	7.51	—	—	—	—	—	3.52	—	6.64

Примечание. Анализы: 1–7 – щелочные габбро, 8–13 – щелочные альбит-ортоклазовые сиениты, 14–23 – щелочные альбитовые сиениты. Прочерк – содержание не определялось.

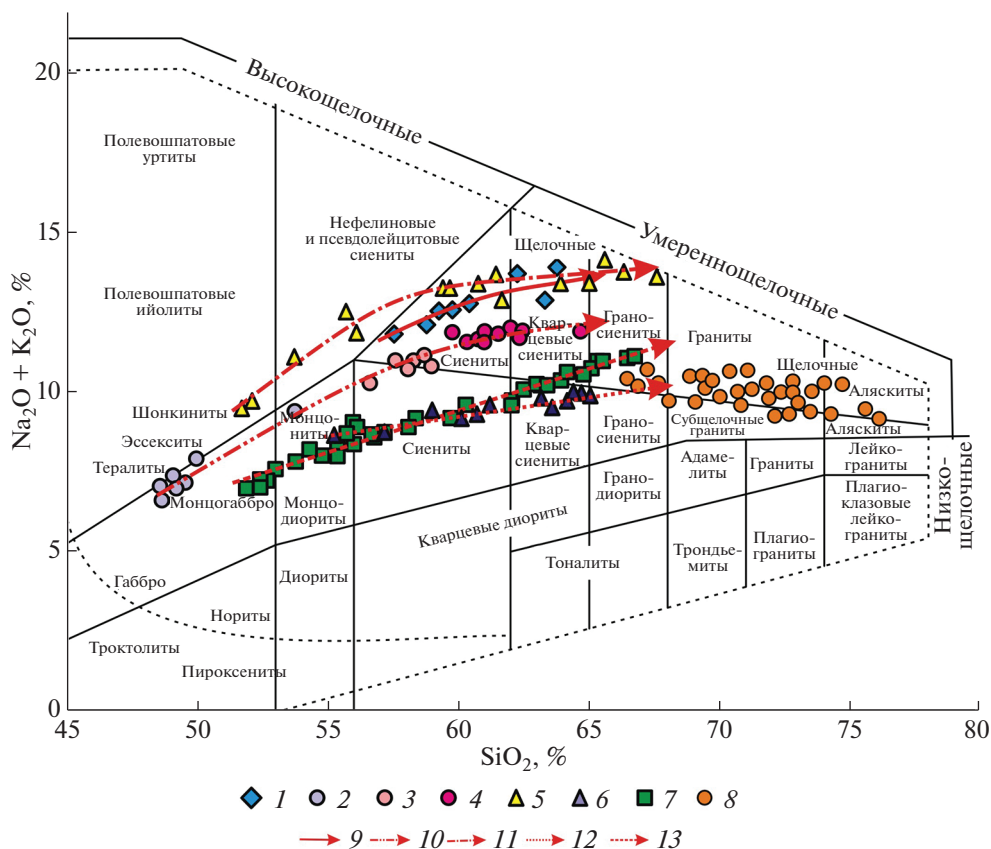


Рис. 2. Положение точек составов неархейских щелочных пород Кольской щелочной провинции на классификационной диаграмме TAS.

1–5 – серия щелочных габбро – нефелиновых сиенитов – щелочных сиенитов – щелочных кварцевых сиенитов: 1 – Низьяврский массив (Петровский, 2019); 2–4 – Панэяврский массив: щелочные габбро 1-й фазы (2), щелочные альбит-ортоклазовые сиениты 2-й фазы (3), щелочные альбитовые сиениты 3-й фазы (4); 5 – Чагвеуайвский массив (Петровский, Петровская, 2018); 6–7 – шшонитовая серия: 6 – Иокангский массив (Петровский, Петровская, 2017); 7 – Островной массив (Петровский, Петровская, 2009); 8 – серия щелочные граносиенитов – гранитов Кейвского блока (Батиева, 1976); 9–13 – тренды дифференциации: Низьяврский массив (9), Панэяврский массив (10), Чагвеуайвский массив (11), Иокангского массива (12), Островной массив (13).

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

1–5 – series of alkaline gabbro – nepheline syenites – alkaline syenites – alkaline quartz syenites: 1 – Nizyavrski massif (Petrovskiy, 2019); 2–4 – Panejavr massif: alkaline gabbro of the 1st phase (2), alkaline albite-orthoclase syenites of the 2nd phase (3), alkaline albite syenites of the 3rd phase (4); 5 – Chagveuave massif (Petrovskiy, Petrovskaya, 2018); 6–7 – shoshonite series: 6 – Iokangski massif (Petrovskiy, Petrovskaya, 2017); 7 – Ostrovnoy massif (Petrovskiy, Petrovskaya, 2009); 8 – series of alkaline granosyenites – granites of the Keivy block (Batueva, 1976); 9–13 – differentiation trends: Nizyavrski massif (9), Panejavr massif (10), Chagveuave massif (11), Iokangski massif (12), Ostrovnoy massif (13).

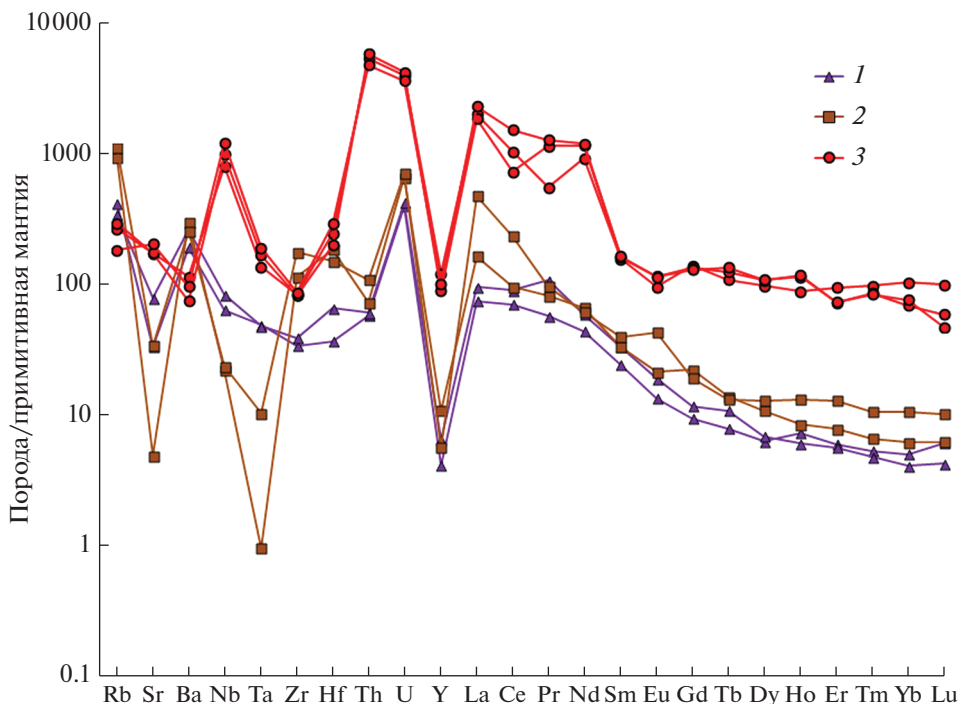


Рис. 3. Распределение нормализованных к примитивной мантии (Sum, MacDonough, 1989) редких элементов в породах Панэяврского массива.

1 – щелочные габбро, 2 – альбит-ортоклазовые сиениты, 3 – щелочные альбит-кварцевые сиениты.

Fig. 3. Distribution of trace elements normalized to primitive mantle (Sum, MacDonough, 1989) in the Panajavir massif rocks.

1 – alkaline gabbro, 2 – albite-orthoclase syenites, 3 – alkaline albite syenites.

род располагаются в областях щелочных сиенитов и щелочных кварцевых сиенитов (рис. 2).

Концентрации редких элементов в представительных образцах главных разновидностей пород Панэяврского массива приведены в табл. 1, а их распределение показано на рис. 3. Все породы массива обогащены редкими землями с резким преобладанием легких лантаноидов (LREE). О значительной фракционированности редкоземельных элементов говорит и высокое лантан-иттербиевое отношение: $(La/Yb)_N = 19.2-44.8$. Содержание LREE на два-три порядка выше хондритового. Особенно обогащены легкими лантаноидами щелочные альбитовые сиениты, что связано с присутствием в их составе минералов-концентраторов редких земель: монацита, пирохлора, торита и чевкинита-(Ce). Содержание LREE в щелочных альбитовых сиенитах достигает 6420 г/т, $\Sigma REE - 6710$ г/т, т.е. на легкие редкие земли приходится 96%.

Для всех пород массива характерны отчетливо выраженные отрицательные аномалии Sr, Ta и Y (рис. 3). Щелочные габбро и альбитовые сиениты, в отличие от альбит-ортоклазовых сиенитов, имеют отрицательные аномалии Zr и Hf. В щелочных габбро и альбит-ортоклазовых сиенитах, в отличие от альбитовых сиенитов наблюдаются – положительные аномалии Ba и отрицательные аномалии Th. Все породы массива

имеют отчетливо выраженные положительные аномалии U. Положительные аномалии Nb, Th и U в щелочных альбитовых сиенитах связаны с их пирохлор-торитовым оруденением; содержание Nb в них достигает 880 г/т, содержание Th – 485 г/т при максимальных содержаниях Ta и U – 5.6 и 87 г/т соответственно. Содержания Zr в щелочных альбит-ортоклазовых сиенитах достигают 2000 г/т, содержания Hf – 47 г/т.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И СОСТАВА REE–Th–Nb МИНЕРАЛОВ

В результате проведенных исследований в щелочных альбитовых сиенитах Панэярского массива установлены пирохлор, монацит, торит и чевкинит-(Ce).

Пирохлор является основной ниобиевым минералом в альбитовых сиенитах. Его содержание достигает 2 об. %, он образует неравномерную вкрапленность (рис. 4, а, б). Размер зерен минерала варьирует от 20–30 мкм до 2 мм. Окраска – бледно-желтая, иногда темно-коричневая. Форма кристаллов различна, но наиболее развиты кристаллы октаэдрического облика. Пирохлор слабо изменен и имеет зональное и блочно-секториальное внутреннее строение (рис. 4, в–е).

Химический состав изученного пирохлора изменяется слабо (табл. 2). На классификационной диаграмме Nb–Ti–Ta (Antecio et al., 2010) фигуративные точки минерала попадают в поле группы пирохлора (рис. 5, а). Согласно номенклатуре группы пирохлора (Antecio et al., 2010) он относится к гидроксикальциопирохлорам с низкими содержаниями Ta и Ti. На классификационной диаграмме Ca–Na–A-vas (вакансия в позиции Ca) все составы минерала попадают в поле магматических пирохлоров, при этом в его составе виден небольшой, но четкий дефицит Na и Ca (рис. 5, б). В сравнении с пирохлором Низьяврского массива, пирохлор Панэярского массива отличается меньшим содержанием микролитового минала компоненты (рис. 5, а), большим содержанием Ca и меньшим – Na (рис. 5, б). Можно было бы ожидать, что пирохлор из более натровых сиенитов Панэярского массива (Na_2O 8.2–10 мас. % по сравнению 4.4–5.5 мас. % в сиенитах Низьяврского массива) будет также более натровым. Но, по-видимому, химический состав пирохлора определяется атомным отношением Na/Ca в расплаве (в сиенитах Панэярского массива атомное отношение Na/Ca равно 5.1–7.1, в сиенитах Низьяврского массива – 9.1–12.5). Меньшее содержание микролитового минала в пирохлоре Панэярского массива в сравнении с Низьяврским массивом объясняется более низкой концентрацией Ta в сиенитах Панэявра (4.7–5.6 г/т) относительно сиенитов Низьявра (6.1–11 г/т).

Монацит является наиболее распространенным редкоземельным минералом в щелочных альбитовых сиенитах. Он образует обильную вкрапленность мелких зерен (1–100 мкм), тяготеет к скоплениям темноцветных минералов (рис. 6). По данным химического анализа (табл. 3), его составы отвечают двум минеральным видам. Монацит-(Ce) встречается чаще и ассоциирует с породообразующими минералами. Содержание La_2O_3 в нем варьирует от 15.6 до 17.3 мас. %, Ce_2O_3 – от 24 до 29 мас. %, он характеризуется высокими содержаниями ThO, UO_2 и Nd_2O_3 и низким содержанием CaO (табл. 3). Монацит-(La) наблюдается только в ассоциации с пирохлором (рис. 4, б) и характеризуется низкими концентрациями ThO, UO_2 и Nd_2O_3 и высоким содержанием CaO (табл. 3). Зерна монацита характеризуются однородным внутренним строением.

Торит встречается в виде единичных изометричных зерен, как в межзерновом пространстве, так и в виде включений в породообразующих минералах (рис. 7, а–д) щелочных сиенитов. Размеры его зерен варьируют от 5 до 400 мкм. По внутреннему строению торит может быть как однородным (мелкие зерна), так и блочно-секториальным (крупные зерна). Состав торита в отношении Th, U и Si выдержан, значительно варьируют только содержания Fe, Ca, Pb и REE (табл. 4). Большой интерес представляет обогащение торита легкими редкими землями, суммарное содержание которых достигает 12.9 мас. % (табл. 4). Такое обогащение LREE типично для магматического торита

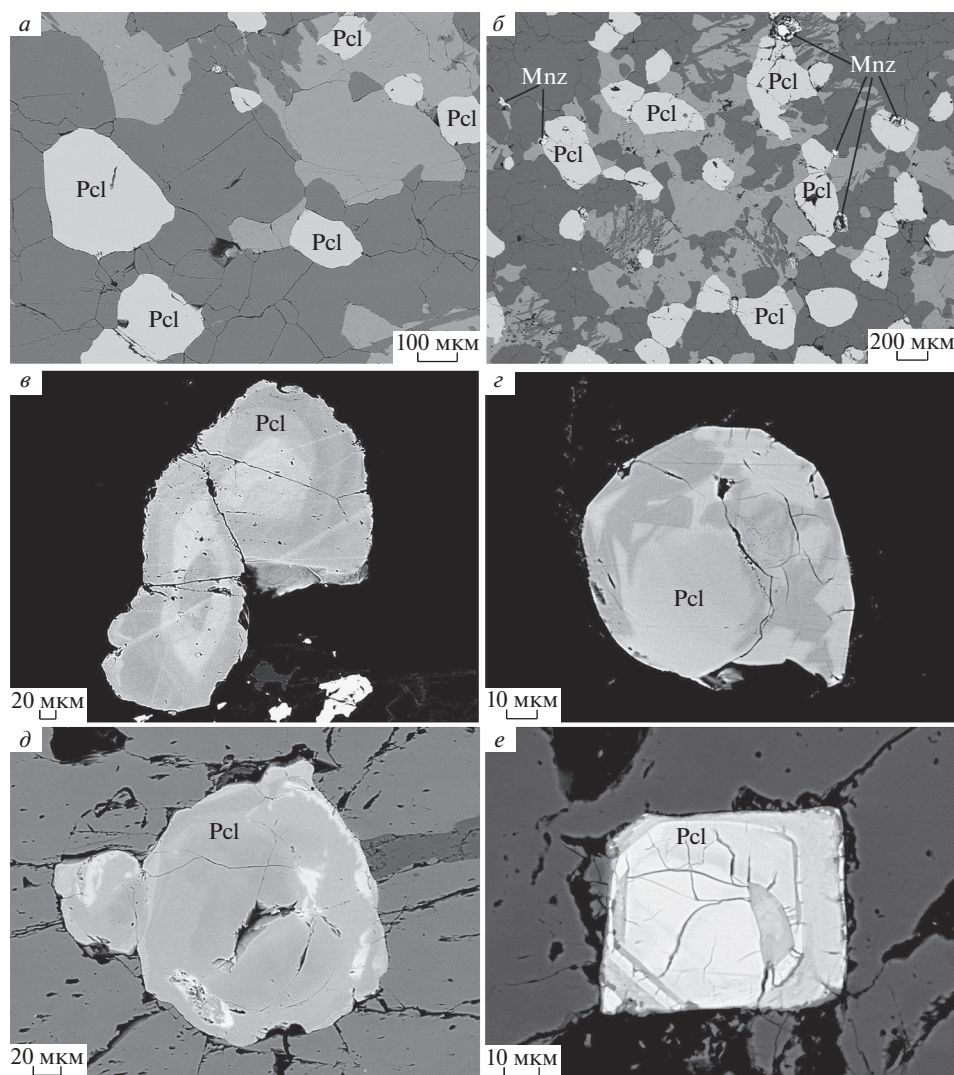


Рис. 4. Пирохлор в щелочных альбитовых сиенитах Панэяврского массива. Изображения в обратно-отраженных электронах. Pcl – пирохлор, Mnz – монацит.

Fig. 4. Pyrochlore in alkaline albite syenites of the Panejavr massif. BSE-images. Pcl – pyrochlore, Mnz – monazite.

(Forster et al., 2000; Pettke et al., 2005; Forster, 2006) и сопоставимо с содержанием редких земель в торите из гранитных пегматитов Эль-Муэрто Мексики, где их суммарное содержание достигает 14.5–24.7 мас. % REE₂O₃, а в составе лантаноидов преобладают легкие редкоземельные элементы (Prol-Ledesma et al., 2012).

Чевкинит-(Ce) встречается в виде мелких изометричных и удлиненных, пластинчатых зерен (рис. 7, *д*, *е*) размером от 1 до 50 мкм, образующих включения в альбите из щелочных сиенитов. Характеризуется выдержанным составом, содержит примеси Nb, Ta, Th, Ca и др. (рис. 4). Зерна чевкинита обладают однородным внутренним строением. Вероятно, имеет магматогенное происхождение (Macdonald et al., 2009; Bagiński et al., 2015).

Таблица 2. Представительные анализы пирохлора (мас. %) из щелочных альбитовых сиенитов Панэяврского массива**Table 2.** Reference analysis of pyrochlore (wt %) from alkaline albite syenites of the Panejavr massif

Компо- нент	124/04		126-3/04			127-1/04			
	Nb ₂ O ₅	64.24	61.95	63.39	62.05	63.75	63.20	65.10	63.28
Ta ₂ O ₅	2.54	2.80	2.10	2.23	1.45	3.12	2.05	2.02	2.00
SiO ₂	–	–	–	0.29	–	–	–	–	–
TiO ₂	4.18	4.63	4.76	4.33	3.93	4.61	3.68	4.21	4.53
ThO ₂	–	–	0.69	0.64	0.17	–	–	–	–
UO ₂	–	–	–	0.09	–	–	–	–	–
CaO	20.42	22.75	20.28	23.96	23.45	22.81	22.00	21.83	22.01
BaO	0.29	–	0.20	0.43	–	–	–	–	–
SrO	0.25	–	–	0.21	–	–	–	–	–
Fe ₂ O ₃	0.54	0.29	–	0.30	0.25	0.12	0.03	–	–
Na ₂ O	4.18	4.46	4.15	4.20	4.54	4.39	4.64	4.88	4.42
La ₂ O ₃	0.71	0.84	0.95	0.60	0.28	0.21	0.56	0.80	0.81
Ce ₂ O ₃	0.93	1.07	1.99	1.23	0.66	0.24	0.81	1.29	1.20
F	1.08	0.75	0.86	1.02	1.12	0.75	1.11	0.99	1.30
Сумма	99.36	99.54	99.37	99.58	99.60	99.45	99.98	99.30	99.95
Коэффициенты в формуле ($B = 2$)									
Nb	1.812	1.794	1.802	1.791	1.836	1.795	1.834	1.828	1.825
Ta	0.043	0.048	0.036	0.040	0.025	0.053	0.035	0.034	0.034
Si	–	–	–	0.018	–	–	–	–	–
Ti	0.145	0.158	0.162	0.151	0.139	0.152	0.131	0.138	0.141
B	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Th	–	–	0.010	0.009	0.002	–	–	–	–
U	–	–	–	0.001	–	–	–	–	–
Ca	1.360	1.425	1.367	1.417	1.434	1.417	1.454	1.420	1.441
Ba	0.007	–	0.005	0.011	–	–	–	–	–
Sr	0.009	–	–	0.008	–	–	–	–	–
Fe ³⁺	0.025	0.014	–	0.014	0.012	0.006	0.001	–	–
Na	0.504	0.516	0.550	0.503	0.524	0.529	0.494	0.523	0.498
La	0.016	0.019	0.022	0.014	0.006	0.005	0.013	0.018	0.018
Ce	0.021	0.025	0.046	0.028	0.015	0.005	0.018	0.029	0.027
A	1.942	1.999	1.990	1.995	1.991	1.962	1.980	1.990	1.984
F	0.212	0.148	0.171	0.208	0.219	0.147	0.217	0.195	0.253

Примечание. Прочерк – содержание компонента ниже порога чувствительности.

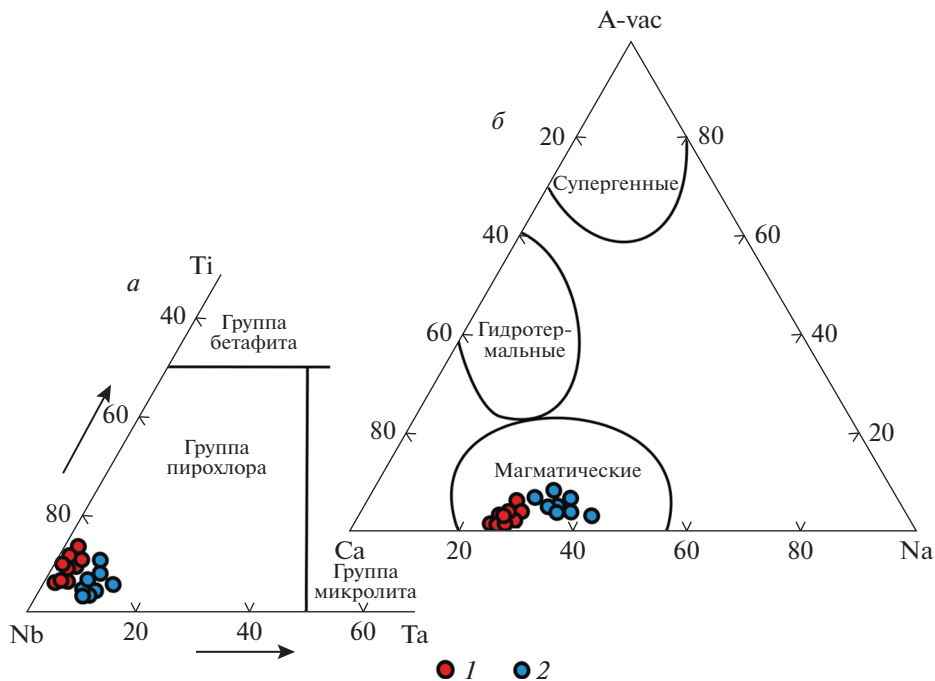


Рис. 5. Составы пирохлора из неархейских щелочных пород Кольской щелочной провинции на классификационных диаграммах (*a* – по: Atencio et al., 2010, *б* – по: Nasraoui, Bilal, 2000).

1 – Панэяврский массив, *2* – Низьяврский массив (Петровский, 2019).

Fig. 5. Compositions of pyrochlore from Neoproterozoic alkaline rocks of the Kola alkaline province on classification diagrams (*a*, after Atencio et al., 2010, *b*, after Nasraoui, Bilal, 2000).

1 – Paneyavr massif; *2* – Nizyavrskiy massif (Petrovskiy, 2019).

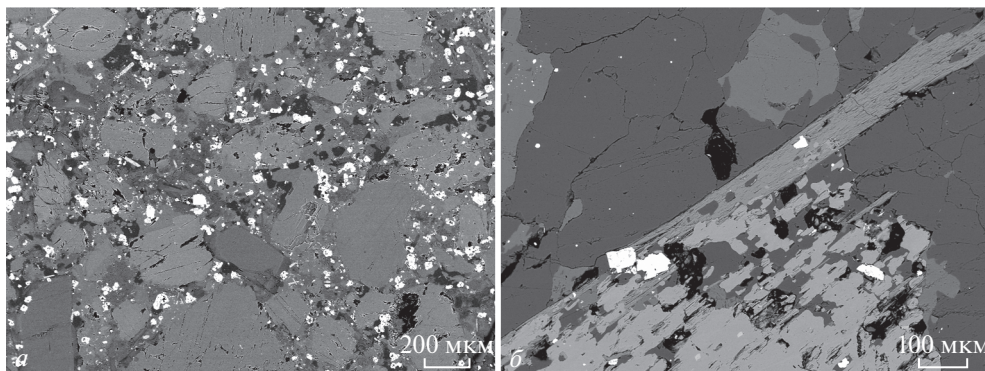


Рис. 6. Монацит (белое) в щелочных альбитовых сиенитах Панэяврского массива. Изображения в обратно-отраженных электронах.

Fig. 6. Monazite (white) in alkaline albite syenites of the Paneyavr massif. BSE-images.

Таблица 3. Представительные анализы монацита (мас. %) из щелочных сиенитов Панэяврского массива**Table 3.** Reference analysis of monazite (wt %) from alkaline albite syenites of the Panejavr massif

Компонент	124/04				126-3/04		127-1/04	
	SiO ₂	0.82	0.73	—	—	0.40	0.65	0.48
ThO ₂	16.49	21.76	0.23	1.16	13.45	11.27	10.55	10.76
UO ₂	0.525	0.68	0.09	0.12	0.63	0.62	0.57	0.53
CaO	0.09	0.03	3.69	4.65	0.04	0.09	0.05	0.07
La ₂ O ₃	16.35	16.00	31.67	29.36	15.62	16.96	15.83	17.30
Ce ₂ O ₃	27.30	24.01	30.44	32.85	27.04	26.84	28.93	28.11
Pr ₂ O ₃	2.34	2.16	1.72	1.65	2.77	2.48	2.74	2.05
Nd ₂ O ₃	10.23	9.52	3.77	0.91	10.47	11.35	11.48	9.59
Sm ₂ O ₃	1.46	1.15	0.25	0.22	1.25	1.56	1.19	1.08
P ₂ O ₅	23.93	23.47	28.10	29.00	28.01	27.86	28.13	29.60
Сумма	99.53	99.37	99.96	99.92	99.71	99.72	99.95	99.81
Коэффициенты в формуле (O = 4)								
Si	0.036	0.032	—	—	0.016	0.027	0.019	0.028
Th	0.164	0.220	0.002	0.010	0.125	0.105	0.098	0.097
U	0.005	0.007	0.001	0.001	0.006	0.006	0.005	0.005
Ca	0.004	0.001	0.157	0.194	0.002	0.004	0.002	0.003
La	0.263	0.262	0.463	0.422	0.236	0.255	0.237	0.252
Ce	0.436	0.390	0.442	0.468	0.405	0.401	0.430	0.407
Pr	0.037	0.033	0.025	0.023	0.041	0.037	0.41	0.030
Nd	0.159	0.151	0.053	0.013	0.153	0.165	0.167	0.136
Sm	0.022	0.018	0.003	0.003	0.018	0.022	0.017	0.015
P	0.884	0.881	0.943	0.956	0.970	0.961	0.967	0.991

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований расширяют рудную специализацию Панэяврского массива, что делает его перспективным объектом для поиска и обнаружения REE–Th–Nb руд. Представленные в статье материалы вносят вклад в понимание закономерностей проявления редкометального оруденения в интрузивных массивах неоархейской серии щелочных габбро – нефелиновых сиенитов – щелочных сиенитов – щелочных кварцевых сиенитов Кольской щелочной провинции.

Работа выполнена в рамках темы НИР ГИ КНЦ РАН № 0226-2019-0053. Автор выражает благодарность А.В. Базай за помощь в проведение электронно-микроскопических исследований минералов.

Таблица 4. Представительные анализы торита и чевкинита-(Ce) (мас. %) из щелочных сиенитов Панэярвского массива**Table 4.** Reference analysis of thorite and chevkinite-(Ce) (wt %) from alkaline albite syenites of the Panejavr massif

Компонент	Торит			Чевкинит-(Ce)		
	124/04	126-3/04	127-1/04	124/04	126-3/04	127-1/04
Nb ₂ O ₅	—	—	—	1.39	1.13	1.48
Ta ₂ O ₅	—	—	—	0.12	0.13	0.23
P ₂ O ₅	0.09	0.09	0.06	—	—	—
SiO ₂	19.41	20.44	21.43	18.70	18.61	18.62
TiO ₂	0.29	0.88	0.06	16.41	15.46	15.84
ThO ₂	46.44	42.63	44.48	2.65	1.01	1.50
UO ₂	7.74	13.83	13.83	—	—	—
FeO	5.27	0.64	0.61	11.22	11.35	11.05
MnO	0.22	0.16	0.09	0.40	0.44	0.39
MgO	0.11	0.17	—	0.10	0.10	0.09
CaO	2.61	0.65	3.02	1.63	0.85	1.80
PbO	1.13	0.29	2.29	0.45	—	0.24
Al ₂ O ₃	1.35	1.13	1.97	0.48	0.39	0.43
Y ₂ O ₃	0.21	—	—	0.49	0.45	0.25
La ₂ O ₃	1.37	2.25	0.53	11.88	12.39	12.26
Ce ₂ O ₃	2.13	7.13	0.28	22.57	24.16	23.27
Pr ₂ O ₃	—	0.86	—	2.02	2.78	2.07
Nd ₂ O ₃	0.62	2.66	—	6.47	7.56	6.31
Sm ₂ O ₃	—	—	—	1.05	1.04	0.71
Gd ₂ O ₃	—	—	—	0.57	0.41	0.35
Сумма	88.99	90.44	88.67	98.33	98.26	96.89
Коэффициенты в формуле: торит (O = 4), чевкинит-(Ce) (O = 22)						
Nb	—	—	—	0.136	0.112	0.146
Ta	—	—	—	0.007	0.009	0.014
P	0.003	0.004	0.003	—	—	—
Si	0.878	1.057	1.188	4.036	4.064	4.059
Ti	0.010	0.034	0.002	0.693	0.539	0.597
Th	0.478	0.502	0.561	0.130	0.050	0.074
U	0.078	0.120	0.171	—	—	—
Fe	0.199	0.028	0.028	2.025	2.069	2.015
Mn	0.008	0.007	0.004	0.073	0.081	0.072
Mg	0.007	0.013	—	0.032	0.033	0.029
Ca	0.127	0.036	0.179	0.377	0.199	0.420
Pb	0.014	0.004	0.034	0.026	—	0.014
Al	0.072	0.069	0.129	0.122	0.100	0.110
Y	0.005	—	—	0.056	0.052	0.029
La	0.023	0.043	0.011	0.946	0.998	0.986
Ce	0.035	0.135	0.006	1.784	1.932	1.858
Pr	—	0.016	—	0.159	0.221	0.164
Nd	0.010	0.049	—	0.499	0.590	0.491
Sm	—	—	—	0.078	0.078	0.053
Gd	—	—	—	0.041	0.030	0.025

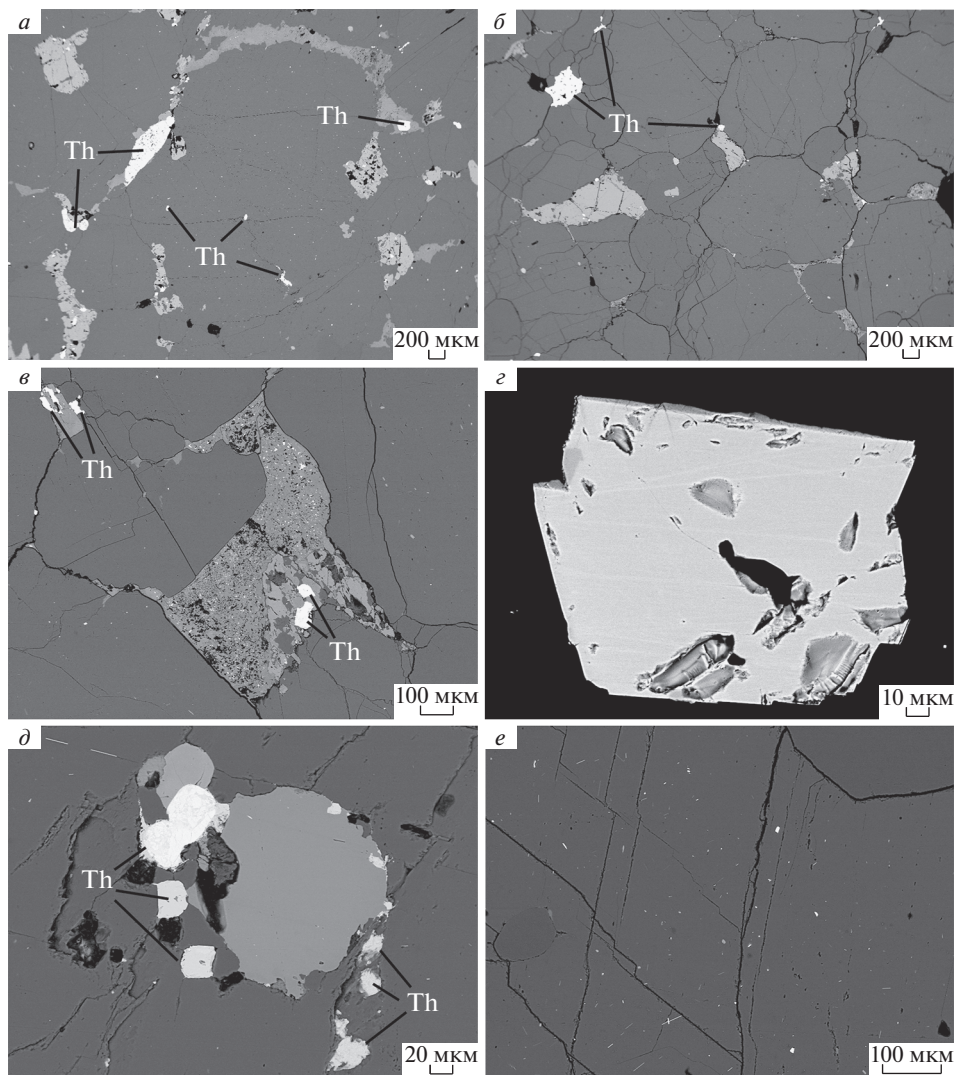


Рис. 7. Торит (*a–d*) и чевкинит-(Ce) (*d–e*, мелкие белые изометричные и удлиненные пластинчатые зерна) в щелочных альбитовых сиенитах Панэяврского массива. Изображения в обратно-отраженных электронах. Th – торит.

Fig. 7. Thorite (*a–d*) and chevkinite-(Ce) (*d–e*, small white isometric and elongated platy grains) in alkaline albite syenites of the Panejavr massif. BSE-images. Th – thorite.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Арзамасцев А.А., Федотов Ж.А., Арзамасцева Л.В. Дайковый магматизм северо-восточной части Балтийского щита. СПб.: Наука, 2009. 383 с.

Батиева И.Д. Петрология щелочных гранитоидов Кольского полуострова. Л.: Наука, 1976. 224 с.

Дубровский М.И. Комплексная классификация магматических горных пород. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2002. 234 с.

Козлов Н.Е., Сорохтин Н.О., Глазнев В.Н., Козлова Н.Е., Иванов А.А., Кудряшов Н.М. Мартынов Е.В., Тюремнов В.А., Матюшкин А.В., Осипенко Л.Г. Геология архея Балтийского щита. СПб.: Наука, 2006. 329 с.

Петровский М.Н. Низьяврский щелочной массив: возраст, изотопные характеристики и редкометальное оруденение // ЗРМО. 2019. № 4. С. 17–29.

Петровский М.Н., Митрофанов Ф.П., Петровская Л.С., Баянова Т.Б. Новый массив архейских щелочных сиенитов в Мурманском домене Кольского полуострова // Доклады РАН. 2009. Т. 424. № 1. С. 89–93.

Петровский М.Н., Петровская Л.С. Петрология высокожелезистых кварцевых монцонитов – монцогранодиоритов Островного массива, Кольский п-ов // ЗРМО. 2009. № 4. С. 11–31.

Петровский М.Н., Петровская Л.С. Неоархейские интрузивные массивы шошонитовой серии в Кольской щелочной провинции: история изучения и геологическая характеристика // Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 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.

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: Изд. К&М, 2013. С. 181–183.

Rare Earth–Thorium–Niobium Mineralization in Alkaline Albite Syenites of the Panejavr Massif (Kola Peninsula)

M. N. Petrovskiy*

Geological Institute Kola Science Centre RAS, Apatity, Russia

**e-mail: petrovskiy@geoksc.apatity.ru*

The article is dedicated to the first results of geochemical and mineralogical studies of the rare earth-thorium-niobium mineralization of rocks in the Neoproterozoic Panejavr alkaline massif. The main phase of the massif is represented by alkaline syenites with high ore concentrations of LREE (6420 ppm), ΣREE (6710 ppm), Nb (880 ppm), Th (485 ppm), and U (87 ppm). Rare metals are concentrated in pyrochlore, monazite, thorite, and chevkinite-(Ce). The obtained data increase the prospects for rare-metal mineralization of the Murmansk Neoproterozoic Craton.

Keywords: syenites, pyrochlore, monazite, thorite, chevkinite-(Ce), Neoproterozoic, Kola alkaline province

REFERENCES

- Arzamastsev A.A., Fedotov Zh.A., Arzamastseva L.V. Dike magmatism in the northeastern part of the Baltic Shield. Saint Petersburg: Nauka, 2009. 383 p. (in Russian).
- Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Giere R., Kartashev P.M. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature. *Canad. Miner.* 2010. Vol. 48. P. 569–594.
- Bagiński B., Macdonald R., Dzierżanowski P. et al. Hydrothermal alteration of chevkinite-group minerals: products and mechanisms. Part 1. Hydration of chevkinite-(Ce). *Miner. Mag.* 2015. Vol. 79. P. 1019–1037.
- Batieva I.D. Petrology of alkaline granitoids of the Kola Peninsula. Leningrad: Nauka, 1976. 224 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: Publishing house K&M, 2013. P. 181–183 (in Russian).
- Dubrovsky M.I. Complex classification of igneous rocks. Apatity: Publishing house of KSC RAS, 2002. 234 p. (in Russian).
- Forster H.-J. Composition and origin of intermediate solid solutions in the system thorite-xenotime-zircon-coffinite. *Lithos.* 2006. Vol. 88. P. 35–55.
- Forster H.-J., Harlov D.E., Milke R. Composition and Th-U-total Pb ages of huttonite and thorite from Gillespie's earl, South Island, New Zealand. *Canad. Miner.* 2000. Vol. 38. P. 675–684.
- Kozlov N.E., Sorokhtin N.O., Glaznev V.N., Kozlova N.E., Ivanov A.A., Kudryashov N.M., Martynov E.V., Tyuremnov V.A., Matyushkin A.V., Osipenko L.G. Geology of the Archean of the Baltic Shield. Saint Petersburg: Nauka, 2006. 329 p. (in Russian).

Macdonald R., Belkin H.E., Wall F., Bagiński B. Compositional variation in the chevkinite group: new data from igneous and metamorphic rocks. *Miner. Mag.* **2009**. Vol. 73. P. 777–796.

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. No. 2. P. 237–251.

Petrovskiy M.N. Niz'yavrski alkaline massif: age, isotope characteristics and rare-metal mineralization. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2019**. N 4. P. 17–29 (in Russian, English translation: *Geol. Ore Deposits*. **2020**. Vol. 62. N 7. P. 564–573).

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. Petrology of the highly ferriferous quartz monzonite – monzogranodiorites of Ostrovnoy massif, Kola Peninsula. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2009**. N 4. P. 11–31 (in Russian).

Petrovskiy M.N., Petrovskaya L.S. The Neo-Archean intrusive massifs of the shoshonite series in the Kola alkaline province: history of exploration and geological characteristic. *Proc. Fersman Sci. Session Geol. Inst. Kola Sci. Centre RAS*. **2017**. N 14. P. 150–155 (in Russian).

Petrovskiy M.N., Petrovskaya L.S. Neoarchean alkaline rocks of the Central Kola block – the Chagveuaysky massif: geology and age. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2018**. N 1. P. 44–54 (in Russian).

Pettke T., Audetat A., Schaltegger U., Heinrich C.A. Magmatic- to hydrothermal crystallization in the W-Sn mineralized Mole Granite (NSW, Australia). Part II: Evolving zircon and thorite trace element chemistry. *Chem. Geol.* **2005**. Vol. 220. P. 191–213.

Prol-Ledesma R.-M., Melgarejo J.C., Martin R.F. The El Muerto “NYF” granitic pegmatite, Oaxaca, Mexico, and its striking enrichment in allanite-(Ce) and monazite-(Ce). *Canad. Miner.* **2012**. Vol. 50. P. 1055–1076.

Sum S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc. Spec. Publ.* **1989**. N 42. P. 313–345.