

**МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ**DOI <https://doi.org/10.30695/zrmo/2019.1486.03>

© Д. чл. М. Н. ПЕТРОВСКИЙ

**РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ МИНЕРАЛЫ КАРБОНАТИТОВЫХ ЖИЛ  
МАССИВА СОУСТОВА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ) —  
ИНДИКАТОР ЕГО РУДНОЙ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ**

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

В статье представлены результаты первых геологических, изотопно-геохимических и минералогических исследований ранее неизвестных для массива Соустова карбонатитовых жил. Изученные жилы имеют сходный с вмещающими породами изотопный (Sm-Nd) состав и близкий модельный возраст, что говорит о едином источнике их формирования. Жилы характеризуются высокими содержаниями редкоземельных элементов цериевой группы, Sr и Nb. Перечисленные элементы концентрируются в бастнезите, стронцианите, монаците и пирохлоре. Полученные данные существенно расширяют представления о геохимической и рудной специализации массива.

*Ключевые слова:* редкоземельные минералы, карбонатиты, массив Соустова, Кольский полуостров.

*M. N. PETROVSKIY. RARE-EARTH MINERALS OF CARBONATE VEINS  
IN THE SOUSTOV MASSIF (KOLA PENINSULA)  
AS AN THE INDICATOR OF ITS ORE SPECIALIZATION*

*Geological Institute Kola Science Centre RAS, Apatity, Russia*

The article presents first results of geological, isotope-geochemical and mineralogical studies of carbonatite veins previously unknown in the Soustov massif. Veins studied have the Sm-Nd isotope composition and model age similar to rocks of the massif, indicating the common source of their formation. High contents of light lanthanides, Sr, and Nb in carbonatite veins were revealed. These elements are concentrated in bastnäesite, strontianite, monazite, and pyrochlore. The data obtained significantly expand the geochemical and ore specialization of the massif.

*Key words:* rare-earth minerals, carbonatites, Soustov massif, Kola Peninsula.

В настоящее время назрела необходимость развития ресурсного потенциала редкоземельных элементов (РЗЭ), и не только за счет известных месторождений, но и за счет малоизученных объектов. Таким объектом может служить массив Соустова, сложенный анальцимовыми и анальцим-нефелиновыми сиенитами. О том, что в сиенитах массива Соустова имеются повышенные содержания РЗЭ, Sr, Ba, Nb, Zr, Th было известно еще с 60-х годов прошлого века. Были установлены и минералы концентраторы этих элементов — апатит, циркон, пирохлор, монацит, торит, бастнезит, стронцианит и барит (Волотовская, Булах, 1971; Кухаренко и др., 1971; Веа et al., 2001). Несмотря на это

и свою расположенность в легкодоступном месте, массив Соустова является одним из слабоизученных объектов Кольской щелочной провинции. Возможно, это связано с тем, что на основной части массива в конце 70-х—начале 80-х годов прошлого века была построена апатит-нефелиновая обогатительная фабрика (АНОФ-3 АО «Апатит») и интерес к изучению массива угас.

В результате проведенных автором в 2012 г. полевых работ, среди пород массива Соустова были обнаружены жилы карбонатитов, не описанные ни одним из предыдущих исследователей. Возможно, их считали палеозойскими щелочными дайками, связанными со становлением Хибинского массива и поэтому не акцентировали на них внимание. Обнаруженные карбонатитовые жилы отличаются от палеозойских щелочных даек своим геологическим положением, изотопно-геохимическими характеристиками и высокими концентрациями РЗЭ, что позволяет по-новому оценить рудный потенциал массива Соустова.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический состав пород определялся методом классического количественного анализа в химико-аналитической лаборатории ГИ КНЦ РАН (аналитик Л. И. Константинова). Содержания редких и рассеянных элементов в карбонатитах определялись ISP-MS методом в лаборатории спектрометрических методов анализа ИХТРЭМС КНЦ РАН (аналитик И. В. Елизарова). Процедура пробоподготовки включала растворение 100 мг порошков в тefлоновой капсуле в смеси  $\text{HNO}_3 + \text{HF}$  при 180 °С в течение 30 мин. После выпаривания раствора полученный порошок растворяли в 100 мл 4 %  $\text{HNO}_3$ . Точность анализа составляла не хуже  $\pm 2$  и  $\pm 5$  % для концентраций 50 и 5 ppm соответственно. Химический состав минералов определялся с помощью электронного зонда «Самеса MS-46» в лаборатории физических методов ГИ КНЦ РАН (аналитик А. В. Базай). В качестве стандартов использовались природные ( $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}$  — диопсид;  $\text{FeO}$  — гематит;  $\text{TiO}_2$  — анатаз;  $\text{CaO}$  — кальцит;  $\text{SrO}$  — целестин;  $\text{BaO}$  — барит;  $\text{Na}_2\text{O}$  — лоренцит;  $\text{K}_2\text{O}$  — вадейт;  $\text{P}_2\text{O}_5$  — апатит;  $\text{F}$  — флюорит;  $\text{ThO}_2$  — торит;  $\text{UO}_2$  — уранинит) и искусственные ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  — металлы Nb и Ta;  $\text{La}_2\text{O}_3$  —  $\text{LaCeS}_2$ ;  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  —  $\text{CeS}$ ;  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  —  $\text{Pr}(\text{WO}_4)_2$ ;  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  —  $\text{NdPO}_4$ ) соединения. Ускоряющее напряжение — 20 кВ, ток зонда — 15 мА. Коэффициенты вариации — 1, 2.5 и 5 % для анализируемых концентраций 10, 1 и 0.25 мас. % соответственно.

Изотопно-геохимические исследования карбонатитов Sm-Nd методом выполнены по стандартным методикам (Баянова, 2004) в лаборатории геохронологии и изотопной геохимии ГИ КНЦ РАН (аналитик Д. В. Елизарова). Погрешность определений изотопного состава Nd не превысила 0.0024 % на уровне 2 $\sigma$ . Ошибка при определении Sm-Nd отношения составляет 0.2 % (2 $\sigma$ ).

### КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАССИВА СОУСТОВА, МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ПОРОД И КАРБОНАТИТОВЫХ ЖИЛ

Палеопротерозойский щелочной массив Соустова расположен в пяти километрах южнее Хибинского палеозойского щелочного комплекса и выполняет субширотную трещинную зону в породах раннепротерозойского Имман-

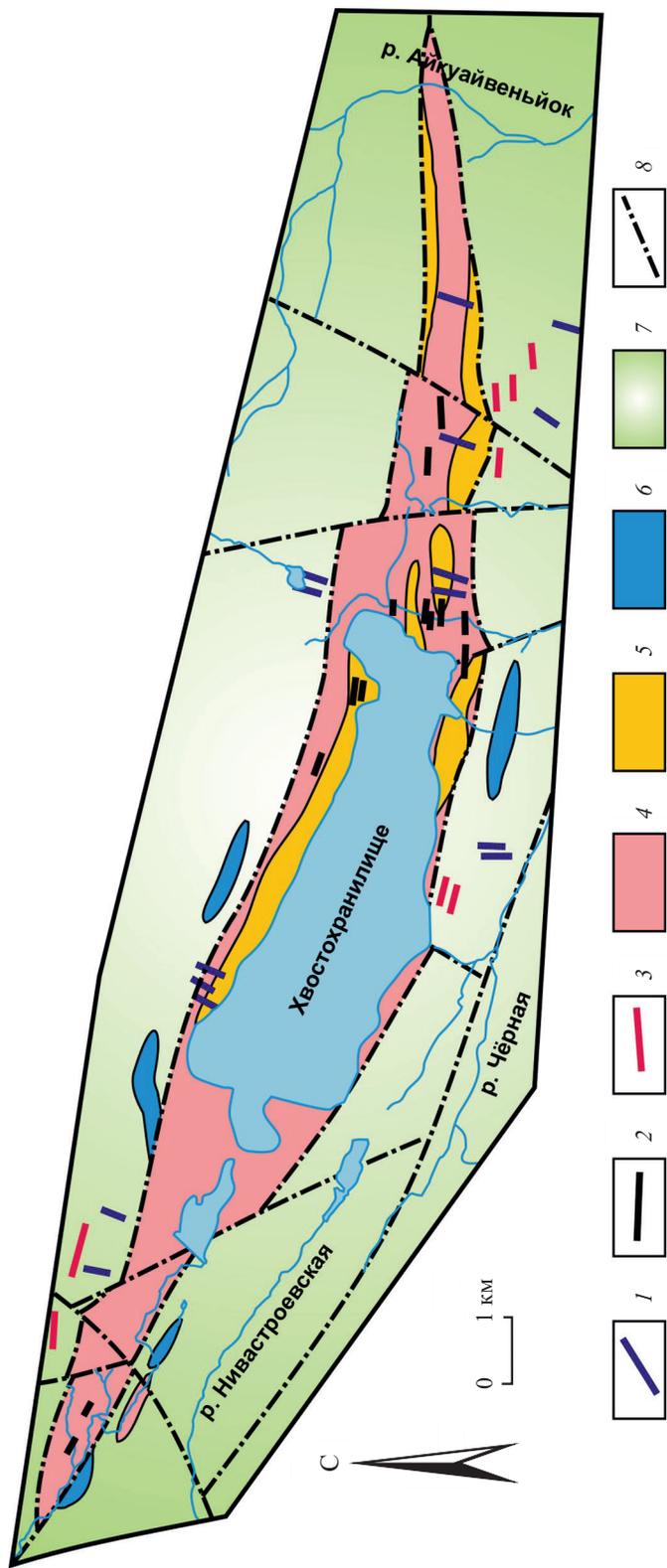


Рис. 1. Схема геологического строения массива Соустова по литературным (Вологовская, Булах, 1971; Кухаренко и др., 1971) и авторским данным.

1 — палеозойские дайки оливиновых меллититов, оливковых меланфелингов, щелочных пикритов, фонолитов; 2–5 — породы массива Соустова: 2 — карбонатитовые жилы, 3 — жилы щелочных кварцевых спенитов, 4 — анальцитовые спениты, 5 — анальцит-нефелиновые спениты; 6 — палеопротерозойские интрузии габбро-диабазов; 7 — метазфудивы основного состава томингской серии Имандра-Варзугской зоны карелии; 8 — разломы.

Fig. 1. Scheme of the geological structure of the Soustov massif according to literary data (Volotovskaya, Bulakh, 1971; Kukharenko et al. 1971) and author's data.

дра-Варзугского вулканогенно-осадочного пояса (Кухаренко и др., 1971; Батиева и др., 1983; 1985; Mitrofanov et al., 1995). Вмещающими породами для массива являются хлоритовые и тальк-хлоритовые сланцы, развитые по эффузивам основного состава томингской серии Имандра-Варзугской зоны карелид (Загородный и др., 1982).

Согласно данным магниторазведки, массив Соустова в плане имеет форму линзообразного тела, вытянутого в северо-западном направлении. Протяженность массива около 20 км, а ширина варьирует от 3 до 0.5 км (рис. 1). Падение контактов и трахитоидности пород массива северное, северо-восточное, под углом 50—70°. Контакты массива секущие, срезающие сланцеватость пород под углом 15—30°. В приконтактной зоне вмещающие породы ороговикованы и пронизаны серией мелких жил анальцимовых и кварцевых щелочных сиенитов.

Внутреннее строение массива достаточно простое, основная часть площади массива сложена анальцимовыми и анальцим-нефелиновыми сиенитами (рис. 1), породы трахитоидные, частью порфириовидные. Трахитоидность ориентирована субсогласно контактам массива.

Анальцимовые сиениты сложены (об. %): микроклин-пертитом (60—70), альбитом (10—12), анальцимом (5—10), эгирином (10—15), катофоритом (2—3), биотитом (1—5), андрадитом (до 1), флюоритом (до 3), а также акцессорными минералами — цирконом, апатитом, бастнезитом, пирохлором, монацитом, титанитом.

Анальцим-нефелиновые сиениты сложены (об. %): микроклин-пертитом (50—60), альбитом (до 10), анальцимом (25—30), нефелином (7—12), эгирином (5—8), андрадитом (2—3), акцессорными цирконом, апатитом, бастнезитом, пирохлором, монацитом, титанитом, флюоритом.

В приконтактных частях массива развиты мелкие жилы кварцевых щелочных сиенитов; кроме того, на удалении от массива (рис. 1) автором обнаружены и крупные жильные тела аналогичных пород. Протяженность крупных жил до 170 м, их мощность варьирует от 2 до 15 м. Жилы имеют запад — северо-западное простирание, падение на север-северо-восток, под углами 70—80°. Щелочные кварцевые сиениты сложены (об. %): микроклином (70—75), альбитом (8—12), кварцем (5—7), эгирином (3—5), рибекитом (2—3), акцессорными титанитом, апатитом, цирконом, торитом.

Среди поздних жильных образований в массиве Соустова автором установлены тринадцать карбонатитовых жил. Жилы имеют субсогласное с трахитоидностью сиенитов залегание, что кардинально отличает их от палеозойских щелочных даек секущих породы массива. Палеозойские дайки имеют субмеридиональное и северо-восточное простирание (рис. 1) и субвертикальное падение. В двух местах наблюдалось пересечение карбонатитовых жил палеозойскими дайками оливинных мелилититов. По простиранию карбонатитовые жилы прослеживаются на расстояние от 5 до 28 м. Мощность жил варьирует от 6 до 0.9 м. По простиранию мощность жил невыдержанная, имеются раздувы и разветвления.

По петрографическому составу среди карбонатитовых жил можно выделить три разновидности: бастнезит-кальцит-флюоритовую, бастнезит-кальцитовую и арфведсонит-бастнезит-анкерит-кальцитовую (рис. 2).

Бастнезит-кальцит-флюоритовые жилы сложены (об. %): бастнезитом (3—5), стронцианитом (1—3), кальцитом (35—45), флюоритом (50—60); акцессорные минералы здесь представлены доломитом, баритом, пирохлором, монацитом.



Рис. 2. Карбонатитовые жилы массива Соустова.

*a* — бастнезит-кальцит-флюоритовые; *б, в* — бастнезит-кальцитовые; *г, д* — арфведсонит-бастнезит-анкерит-кальцитовые.

Fig. 2. Carbonatite veins in the Soustov massif.

Бастнезит-кальцитовые жилы сложены (об. %): бастнезитом (5—10), кальцитом (90—95), аксессуарными доломитом, стронцианитом, монацитом.

Арфведсонит-бастнезит-анкерит-кальцитовые жилы сложены (об. %): арфведсонитом (10—20), бастнезитом (2—3), анкеритом (10—15), кальцитом (60—75), аксессуарными пироксеном, баритом, стронцианитом, флюоритом, монацитом, андрадитом.

Возраст формирования пород массива Соустова оценивается как палеопротерозойский. Согласно (Veя et al., 2001), возраст кристаллизации сиенитов,

определенный U-Pb методом по циркону, равен  $1872 \pm 8$  млн лет, согласно данным И. Д. Батиевой и соавторов (1983) изохронный возраст, определенный Rb-Sr методом по породам, равен 2000 млн лет.

## ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАРБОНАТИТОВЫХ ЖИЛ

Для геохимических исследований были отобраны шесть образцов карбонатитов, по два образца из каждой разновидности жил. Их химический состав приведен в табл. 1.

Бастнезит-кальцит-флюоритовые и бастнезит-кальцитовые карбонатиты характеризуются низкими содержаниями петрогенных элементов, кроме Ca, F и CO<sub>2</sub> (табл. 1). Высокие содержания Si, Al, Fe, Mn, Mg и Na характерны лишь для арфведсонит-бастнезит-анкерит-кальцитовых карбонатитов. Во всех проанализированных образцах повышены содержания Sr, Ba, LREE и Nb. Содержания Zr, U, Th сильно варьируют, что указывает на сходство составов изученных карбонатитов как со среднемировыми составами кальцио- и магнезиокарбонатитов (Wooley, Kempe, 1989), так и с палеопротерозойскими карбонатитами Кольской щелочной провинции из массива Гремяха-Вырмес (Сорохтина и др., 2012). В наибольшей степени Sr и Ba обогащены бастнезит-кальцит-флюоритовые карбонатиты, легкими лантаноидами — бастнезит-кальцитовые карбонатиты (табл. 1).

Изотопные Sm-Nd данные приведены в табл. 2. Изотопный состав изученных карбонатитов [ $\epsilon_{Nd}(1880 \text{ млн лет}) = -1.40 \div +1.23$ ] сходен с изотопными составами сиенитов массива Соустова [ $\epsilon_{Nd}(1880 \text{ млн лет}) = -1.59 \div +1.72$ ] (Bea et al., 2001) и пород щелочного комплекса и карбонатитов массива Гремяха-Вырмес [ $\epsilon_{Nd}(1880 \text{ млн лет}) = -2.00 \div +1.30$ ] (Саватенков и др., 1999; Арзамасцев и др., 2006). Сходны также и модельные Sm-Nd возраста изученных карбонатитов ( $t_{Nd} = 2269\text{—}2501$  млн лет) с модельными Sm-Nd возрастами сиенитов массива Соустова ( $t_{Nd} = 2180\text{—}2420$  млн лет) (Bea et al., 2001) и пород щелочного комплекса и карбонатитов массива Гремяха-Вырмес ( $t_{Nd} = 2265\text{—}2839$  млн лет) (Саватенков и др., 1999; Арзамасцев и др., 2006). Сходство изотопных характеристик изученных карбонатитовых жил и сиенитов массива Соустова указывает на генетическую их связь, что отличает карбонатитовые жилы от палеозойских даек с модельным возрастом  $t_{Nd} = 767\text{—}964$  млн лет и другими изотопными характеристиками (Арзамасцев и др., 2009).

## РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ МИНЕРАЛЫ КАРБОНАТИТОВЫХ ЖИЛ

Рудная редкометалльная и редкоземельная минерализация в карбонатитовых жилах массива Соустова представлена бастнезитом, стронцианитом, монацитом и пирохлором. Основными рудными минералами являются бастнезит и стронцианит.

*Бастнезит-(Ce)* образует либо равномерную вкрапленность зерен, приуроченных к границам зерен кальцита и флюорита в бастнезит-кальцит-флюоритовых карбонатитах (рис. 3, а), и зерен порообразующих карбонатов и арфведсонита в арфведсонит-бастнезит-анкерит-кальцитовых карбонатитах (рис. 3, з), либо вкрапленность и прожилки в бастнезит-кальцитовых карбонатитах (рис. 3, б, в). Размер зерен бастнезита варьирует от 3—5 мкм до 7 мм.

**Химический состав (мас. %) и содержание элементов-примесей (г/т)  
в карбонатитовых жилах массива Соустова**

**Chemical compositions (wt %) and content impurity elements (ppm) in carbonatite veins  
of the Soustov massif**

Компоненты	Карбонатитовые жилы					
	бастнезит-кальцит- флюоритовые		бастнезит-кальцитовые		арфведсонит-бастнезит- анкерит-кальцитовые	
	St-33/12	St-21/12	St-38/12	St-36/12	St-45/12	St-9/12
SiO <sub>2</sub>	0.69	0.31	0.08	0.02	7.41	6.36
TiO <sub>2</sub>	0.06	0.04	0.10	0.10	0.28	0.34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.57	0.15	0.14	0.06	1.29	1.42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.23	0.21	0.13	0.09	7.87	5.05
FeO	0.41	0.39	0.17	0.24	3.55	4.04
MnO	0.03	0.03	0.01	0.01	0.49	0.41
MgO	0.24	0.51	0.25	0.37	3.63	3.87
CaO	45.97	46.05	51.02	47.66	31.32	33.08
Na <sub>2</sub> O	0.44	0.36	0.10	0.02	5.24	4.20
K <sub>2</sub> O	0.04	0.01	—	—	0.17	0.10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.25	0.77	0.13	0.09	0.11	0.09
F	20.65	21.04	5.04	4.60	4.74	4.81
CO <sub>2</sub>	25.07	26.39	43.16	43.27	29.25	31.11
S	0.05	0.02	0.01	0.01	0.13	0.15
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.41	0.50	0.28	0.12	1.13	1.07
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.53	0.58	0.17	0.15	0.75	0.69
Сумма	96.64	97.36	96.79	96.81	97.36	96.79
Rb	2	2	4	3	30	39
Ba	340	131	122	116	183	206
Sr	15895	11648	4071	2123	4123	3628
Ta	5	3	2	2	3	2
Nb	154	176	145	139	199	171
Hf	0.12	0.12	0.03	0.04	2.8	3.2
Zr	24	25	7	9	367	245
Y	14	16	4	4	63	20
Th	58	30	0.08	0.05	61	87
U	19	11	0.17	0.09	95	112
La	1078	943	5033	6371	1237	1343
Ce	3685	4762	11518	14808	4154	6762
Pr	289	436	872	1136	681	901
Nd	682	787	2080	3574	803	868
Sm	35	41	95	101	50	68
Eu	1.39	3.74	6.47	9.44	4.09	5.13
Gd	5.33	9.51	21.43	60.13	6.81	7.15
Tb	0.37	1.02	2.80	3.68	0.73	0.71
Dy	1.21	1.87	4.06	5.72	2.50	2.70
Ho	0.19	0.25	0.78	1.15	0.54	0.62
Er	0.44	0.56	1.87	1.92	0.97	0.93
Tm	0.05	0.08	0.24	0.33	0.11	0.15
Yb	0.37	0.66	1.25	2.10	0.86	0.88
Lu	0.06	0.06	0.21	0.38	0.08	0.10

Sm-Nd изотопные данные для карбонатитовых жил массива Соустова  
Sm-Nd isotopic data for carbonatite veins of the Soustov massif

№ образца	Содержание, ppm		Изотопные отношения		Модельный возраст (млн лет) DM	$\epsilon_{Nd}(t)$ на 1880 млн лет
	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$		
St-45/12	46.72	86.50	0.1097	$0.511618 \pm 15$	2240	+1.10
St-9/12	47.04	86.79	0.1090	$0.511535 \pm 11$	2344	-0.35
St-33/12	52.11	94.31	0.1079	$0.511602 \pm 11$	2225	+1.23
St-21/12	48.33	92.16	0.1085	$0.511465 \pm 12$	2433	-1.60
St-38/12	50.46	109.40	0.1087	$0.511478 \pm 16$	2419	-1.40
St-36/12	55.67	135.08	0.1092	$0.511560 \pm 13$	2312	+0.10

Примечание. Названия пород см. табл. 1.

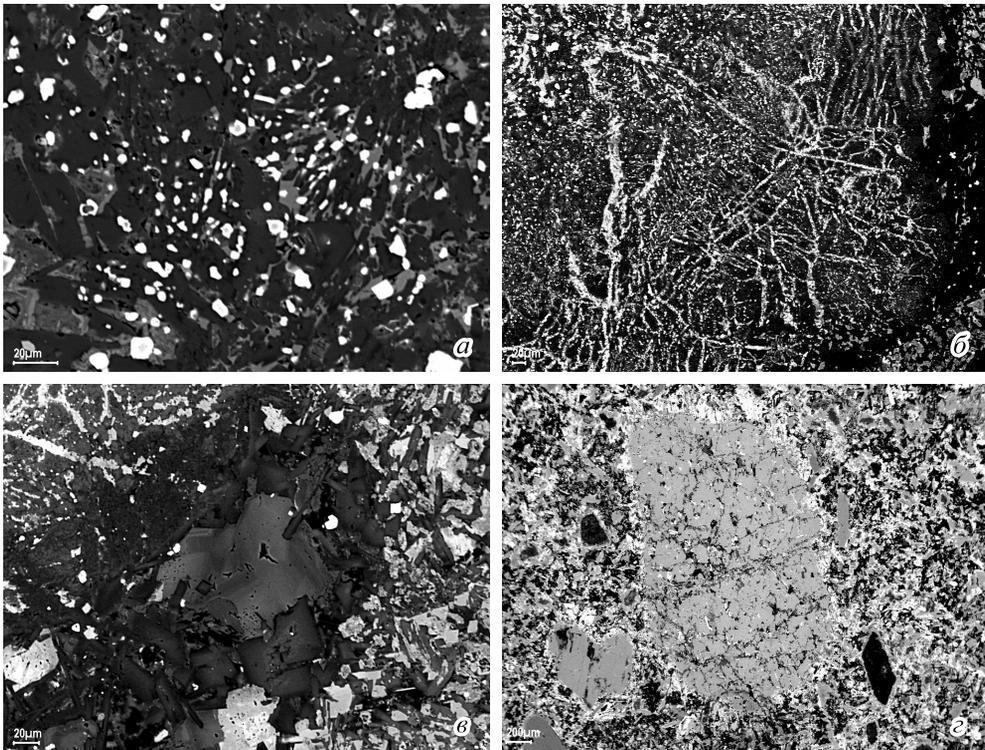


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения бастнезита и стронцианита.

*a* — бастнезит (белое) в бастнезит-кальцит-флюоритовых карбонатите, образец St-33/12; *б* — бастнезит (белое) в бастнезит-кальцитовом карбонатите, образец St-38/12; *е* — бастнезит (белое) и стронцианит (серое зерно в центре снимка) в бастнезит-кальцитовом карбонатите, образец St-38/12; *з* — бастнезит (белое) в арфведсонит-бастнезит-анкерит-кальцитовом карбонатите, образец St-9/12.

Fig. 3. BSE images of bastnaesite and strontianite.

Химические составы (мас. %) бастнезита из карбонатитовых жил массива Соустова  
 Chemical composition (wt %) of bastnäesite from carbonatite veins of the Soustov massif

Компоненты	St-33/12			St-38/12			St-9/12		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CaO	3.57	4.72	0.60	0.43	1.86	1.10	0.51	0.57	0.42
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.04	27.82	29.38	31.51	32.54	31.27	29.47	27.82	25.81
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.45	35.44	30.45	34.53	35.41	37.83	35.35	37.84	37.52
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.84	1.79	0.87	1.88	2.18	1.77	2.47	1.68	2.47
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.08	4.40	3.35	5.75	5.79	5.22	5.89	6.63	6.44
F	7.71	7.34	6.64	7.34	6.70	6.59	7.29	6.82	7.39
Сумма	72.69	81.51	71.29	81.44	84.48	83.78	80.98	81.36	80.05
Коэффициенты в формуле (O = 3)									
Ca	0.084	0.092	0.014	0.012	0.051	0.035	0.016	0.019	0.011
La	0.372	0.403	0.471	0.453	0.455	0.452	0.411	0.390	0.350
Ce	0.517	0.506	0.488	0.491	0.499	0.511	0.508	0.562	0.549
Pr	0.172	0.029	0.017	0.032	0.037	0.030	0.042	0.029	0.043
Nd	0.036	0.029	0.063	0.096	0.096	0.080	0.099	0.113	0.109
F	1.070	1.048	1.007	1.005	0.997	0.989	1.004	1.003	1.004
Ce/La	1.40	1.27	1.04	1.10	1.09	1.21	1.20	1.36	1.45
Ce/Nd	14.16	8.05	9.09	6.01	6.12	7.25	6.00	5.71	5.87
La/Nd	10.11	6.32	8.77	5.48	5.62	5.99	5.00	4.20	4.01

Примечание. 1—9 — номера анализов.

В образцах с крупными выделениями бастнезита, минерал окрашен в бурый либо красновато-бурый цвет. По данным микрозондовых исследований химический состав бастнезита отличается высоким содержанием La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, соизмеримым содержанием Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (табл. 3). Отношение Ce/La заключено в пределах 1.04—1.45. Кроме того, изученный бастнезит характеризуется высокими содержаниями Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO (табл. 3). В одном зерне минерала из бастнезит-кальцит-флюоритовых карбонатитов зафиксировано аномально высокое содержание Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (9.84 мас. %).

*Стронцианит* образует рассеянную вкрапленность между зернами породообразующих минералов, а также выполняет редкие прожилки и пустоты. Размер зерен стронцианита варьирует от 100 мкм до 2 мм. Химический состав стронцианита характеризуется постоянной примесью CaO, BaO, MgO, FeO, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (табл. 4). Кроме того, в химическом составе стронцианита постоянно отмечаются примеси MgO и FeO, что возможно связано с захватом магния из окружающих стронцианит магниезильных карбонатов. Следует отметить, что в породообразующих карбонатах (кальците, доломите и анкерите) постоянно присутствует небольшая примесь стронция.

*Монацит-(Ce)* является распространенным акцессорным редкоземельным минералом в изученных жилах. Он равномерно рассеян в породах и представлен как отдельными зернами с размерами от 20 до 50 мкм, так и сноповидными и игольчатыми агрегатами, образующими сростки с бастнезитом и стронцианитом. Химически состав монацита отличается повышенными содержаниями La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (табл. 5). Для него характерны примеси ThO<sub>2</sub>, Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, причем содержание Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> очень высокое — 6.84—9.48 мас. % (табл. 5).

**Химические составы (мас. %) стронцианита из карбонатитовых жил массива Соустова**  
**Chemical composition (wt %) of strontianite from carbonatite veins of the Soustov massif**

Компоненты	St-33/12			St-38/12	St-9/12
	1	2	3	4	5
CaO	4.58	6.46	7.39	5.14	7.46
SrO	50.34	48.45	47.16	52.03	46.34
BaO	0.32	0.19	0.27	0.02	1.16
MgO*	1.21	1.47	1.17	0.08	0.87
FeO*	0.12	0.09	0.05	—	0.70
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.07	0.05	0.12	0.29
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.15	0.13	0.16	0.28	0.47
Сумма	56.76	56.86	56.26	57.67	57.29
Коэффициенты в формуле (O = 3)					
Ca	0.125	0.173	0.199	0.141	0.201
Sr	0.870	0.819	0.791	0.854	0.775
Ba	0.003	0.002	0.003	0.001	0.011
La	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003
Ce	0.001	0.001	0.001	0.003	0.004

Примечание. 1—5 — номера анализов; \* — MgO и FeO из расчета кристаллохимических формул исключены.

**Химические составы монацита (мас. %) из карбонатитовых жил массива Соустова**  
**Chemical composition of monazite (wt %) from carbonatite veins of the Soustov massif**

Компоненты	St-33/12			St-38/12		St-9/12
	1	2	3	4	5	6
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.74	22.66	23.87	22.77	19.73	22.33
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35.52	36.23	36.56	35.93	37.08	36.67
Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.61	2.05	1.91	2.02	2.59	1.72
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.48	7.82	6.84	8.75	9.21	8.77
ThO <sub>2</sub>	1.55	1.96	2.30	1.79	2.14	2.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	28.06	29.25	28.45	28.72	29.19	28.34
Сумма	99.96	99.97	99.93	99.98	99.94	99.91
Коэффициенты в формуле (O = 4)						
La	0.340	0.333	0.355	0.337	0.290	0.333
Ce	0.527	0.528	0.540	0.528	0.541	0.542
Pr	0.039	0.030	0.028	0.030	0.038	0.025
Nd	0.137	0.111	0.098	0.125	0.131	0.127
Th	0.014	0.018	0.021	0.016	0.019	0.019
P	0.963	0.985	0.970	0.975	0.984	0.969

Примечание. 1—6 — номера анализов.

*Пирохлор* образует микроскопические кристаллы октаэдрического габиту-са. Размер кристаллов достаточно выдержан и составляет 70—100 мкм. Основной чертой внутреннего строения пирохлора является его зональность. В проходящем свете пирохлор из бастнезит-кальцит-флюоритовых карбонатитов имеет желтую окраску, а пирохлор из бастнезит-кальцитовых и арфведсонит-

## Химические составы пирохлора (мас. %) из карбонатитовых жил массива Соустова

## Chemical composition of pyrochlore (wt %) from carbonatite veins of the Soustov massif

Компоненты	St-33/12		St-38/12	St-9/12
	1	2	3	4
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	67.13	65.78	45.74	43.35
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.52	2.99	12.38	11.87
SiO <sub>2</sub>	—	—	1.14	1.46
TiO <sub>2</sub>	0.10	0.37	2.52	2.93
ThO <sub>2</sub>	0.23	0.53	0.28	0.34
UO <sub>2</sub>	0.60	0.94	10.21	11.13
CaO	14.12	13.85	9.18	9.31
BaO	1.49	2.52	6.87	8.49
SrO	4.73	4.09	4.34	4.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.81	0.64	1.07	1.32
MgO	0.15	0.17	0.48	0.34
Na <sub>2</sub> O	5.95	5.28	1.26	1.71
K <sub>2</sub> O	0.20	0.22	0.14	0.25
F	2.26	2.44	2.05	1.46
Сумма	99.29	99.82	97.66	98.12

Коэффициенты в формуле (B = 2)\*

	Катионы			
Nb	1.930	1.897	1.514	1.478
Ta	0.026	0.055	0.246	0.243
Si	—	—	0.042	0.039
Ti	0.005	0.018	0.139	0.166
Th	0.003	0.008	0.005	0.006
U	0.008	0.013	0.166	0.187
Ca	0.962	0.947	0.720	0.752
Ba	0.037	0.063	0.197	0.251
Sr	0.174	0.151	0.184	0.207
Fe <sup>3+</sup>	0.039	0.031	0.059	0.075
Mg	0.014	0.016	0.052	0.038
Na	0.734	0.653	0.179	0.250
K	0.016	0.018	0.013	0.024
A	1.950	1.869	1.517	1.716
B	2.000	2.000	2.000	2.000
	Анионы			
F	0.455	0.492	0.478	0.348
O	6.347	6.413	5.554	5.799
OH <sup>-</sup>	0.198	0.095	3.246	2.311
H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	0.050	0.131	0.483	0.284

Примечание. 1—4 — номера анализов; \* — расчет выполнен по методу А. А. Кухаренко и А. С. Сергеева (Булах, 1964).

бастнезит-анкерит-кальцитовых карбонатитов — зелено-бурую окраску. Химический состав пирохлора из бастнезит-кальцит-флюоритовых карбонатитов приближается к составу обычного пирохлора. Он характеризуется полным отсутствием в составе Та, низкими содержаниями Si, Ti, U, Ba, Fe, Mg и высокими концентрациями Са и Na (табл. 6). Пирохлор из бастнезит-кальцитовых и

арфведсонит-бастнезит-анкерит-кальцитовых карбонатитов содержит в своем составе до 30 % микролитовой составляющей и характеризуется высокими содержаниями Ta, Si, U, Fe, Ba и низкими концентрациями Ca и Na (табл. 6). Содержание SrO во всех разновидностях пирохлора близкое. Таким образом, по своим характеристикам изученный пирохлор можно соотносить с пирохлором из карбонатитов палеопротерозойского массива Гремяха-Вырмес (Sorokhtina et al., 2010).

## ВЫВОДЫ

В щелочном палеопротерозойском массиве Соустова выявлены ранее неизвестные карбонатитовые жилы. Геологические и изотопно-геохимические данные свидетельствуют о генетической связи сиенитов массива Соустова и изученных карбонатитов.

Установлена рудная редкоземельно-стронций-ниобиевая специализация изученных карбонатитов, что подтверждается как высоким содержанием LREE, Sr и Nb в них, так и минеральным составом карбонатитов (широким развитием в них бастнезита, стронцианита, моноцита и пирохлора).

Результаты проведенных исследований существенно расширяют рудную специализацию массива Соустова. Возможно, что дальнейшее изучение этого массива позволит выявить новое редкоземельное месторождение в Кольской щелочной провинции.

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., Беа Ф., Арзамасцева Л. В., Монтеро П. Протерозойский полифазный массив Гремяха-Вырмес, Кольский полуостров: пример смешения базитовых и щелочных мантйных расплавов // Петрология. 2006. № 4. С. 384—414.
- Арзамасцев А. А., Федотов Ж. А., Арзамасцева Л. В. Дайковый магматизм северо-восточной части Балтийского щита. СПб.: Наука, 2009. 383 с.
- Батиева И. Д., Бельков И. В., Кравченко М. П. и др. Возраст щелочного массива Соустова на Кольском полуострове // Доклады АН СССР. 1983. Т. 270. № 4. С. 931—933.
- Батиева И. Д., Бельков И. В., Ветрин В. Р. и др. Магматические формации докембрия северо-восточной части Балтийского щита. Л.: Наука, 1985. 176 с.
- Баянова Т. Б. Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. СПб.: Наука, 2004. 174 с.
- Булах А. Г. Руководство и таблицы для расчета формул минералов. Л.: Недра, 1964. 133 с.
- Волотовская Н. А., Булах А. Г. Геология и петрология массива Соустова (Кольский п-ов) // Петрология и структурный анализ кристаллических образований. Л.: Наука, 1971. С. 157—167.
- Загородный В. Г., Предовский А. А., Басалаев А. А., Батиева И. Д., Борисов А. Е., Ветрин В. Р., Жангуров А. А., Латышев Л. Н., Мележик В. А., Петров В. П., Радченко А. Т., Смолькин В. Ф., Федотов Ж. А. Имандра-Варзугская зона карелид (геология, геохимия, история развития). Л.: Наука, 1982. 280 с.
- Кухаренко А. А., Булах А. Г., Ильинский Г. А., Шинкарёв Н. Ф., Орлова М. П. Металлогенетические особенности щелочных формаций восточной части Балтийского щита. Л.: Недра, 1971. 280 с.
- Саватенков В. М., Пушкарев Ю. Д., Сергеев А. В., Сулимов Р. Б. Карбонатиты Гремяха-Вырмес как индикатор новой рудной специализации массива (Россия) // Геология рудных месторождений. 1999. № 5. С. 449—454.

Сорохтина Н. В., Когарко Л. Н., Шпаченко А. К., Грознова М. В., Костицын Ю. А., Поци-на И. А., Гредина И. В. Геохимия и возраст пород щелочных метасоматитов и карбонатитов массива Гремяха-Вырмес, Кольский полуостров // Геохимия. 2012. № 12. С. 1083—1095.

## References

Arzamastsev A. A., Bea F., Arzamastseva L. V., Montero P. Proterozoic, Gremyaha-Vyrmes polyphase massif, Kola Peninsula: an example of basic and alkaline mantle melts mixing. *Petrology*. 2006. No. 4. P. 384—414 (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).

Batieva I. D., Belkov I. V., Kravchenko M. P., Kravchenko E. V., Latyshev L. N., Pushkarev Yu. D., Ulyanenko N. A. Age of the Sostova alkaline massif on the Kola Peninsula. *Doklady Acad. Sci. USSR*. 1983. Vol. 270. No. 4. P. 931—933.

Batieva I. D., Belkov I. V., Vetrin V. R. et al. The magmatic formations of Precambrian of the northeastern part of the Baltic Shield. Leningrad: Nauka, 1985. 176 p. (in Russian).

Bayanova T. B. Age of reference geological complex on the Kola Peninsula and duration magmatic processes. Saint Petersburg: Nauka, 2004. 176 p. (in Russian).

Bea F., Arzamastsev A., Montero P., Arzamastseva L. Anomalous alkaline rocks of Soustov, Kola: evidence of mantle-derived metasomatic fluids affecting crustal materials. *Contrib. Mineral. Petrol.* 2001. Vol. 140. P. 554—566.

Bulakh A. G. Manual and tables for the calculation of mineral formulae. Leningrad: Nedra, 1964. 133 p. (in Russian).

Kukharev A. A., Bulakh A. G., Ilinsky G. A. et al. Metallogenic features of alkaline formations of the eastern part of the Baltic Shield. Leningrad: Nedra, 1971. 280 p. (in Russian).

Mitrofanov F. P., Pozhilenko V. I., Smolkin V. F., Arzamastsev A. A., Lyubtsov V. V., Shipilov Ed. N., Fedotov G. A. Geology of the Kola Peninsula. Apatity: KSC RAS, 1995. 145 p.

Savatenkov V. M., Pushkarev Yu. D., Sergeev A. V., Sulimov R. B. Carbonatites of the Gremyaha-Vyrmes as an indicator of the new ore massif specialization (Russia). *Geol. Ore Deposits*. 1999. No. 5. P. 449—454 (in Russian).

Sorokhtina N. V., Kogarko L. N., Shpachenko A. K. New data on mineralogy and geochemistry of rare-metal mineralization of the Gremyaha-Vyrmes massif. *Doklady Earth Sci.* 2010. Vol. 434. No. 1. P. 1240—1244.

Sorokhtina N. V., Kogarko L. N., Shpachenko A. K., Groznova M. V., Kostitsyn Y. A., Roshchina I. A., Gredina I. V. Geochemistry and age of alkaline metasomatite and carbonatite rocks of the Gremyaha-Vyrmes massif, Kola Peninsula. *Geochemistry*. 2012. No. 12. P. 1083—1095 (in Russian).

Volotovskaya N. A., Bulakh A. G. Geology and Petrology of the Soustovo massif (Kola Peninsula). Petrology and structural analysis of crystalline formations. Leningrad: Nauka, 1971. P. 157—167 (in Russian).

Zagorodny V. G., Predovsky A. A., Basalaev A. A., Batieva I. D., Borisov A. E., Vetrin V. R., Zhangurov A. A., Latyshev L. N., Melezhik V. A., Petrov V. P., Radchenko A. T., Smolkin V. F., Fedotov G. A. Imandra-Varzugskaya Karelid zone (geology, geochemistry, history of development). Leningrad: Nauka, 1982. 280 p. (in Russian).

Wooley A. R., Kempe D. R. C. Carbonatites: Nomenclature, average chemical compositions and element distribution. Carbonatites: genesis and evolution. London: Unwin Hyman, 1989. P. 1—14.

Поступила в редакцию  
2 мая 2019 г.