

МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ ПОРОД И УСЛОВИЯ МЕТАМОРФИЗМА КАНДАЛАКШСКОГО ГАББРО-АНОРТОЗИТОВОГО МАССИВА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ)

© 2016 г. В. В. Чашин, Е. Н. Стешенко, Е. Э. Савченко, Я. А. Пахомовский, А. В. Базай

Геологический институт КНЦ РАН
184209, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14
E-mail: chashchin@geoksc.apatity.ru

Поступила в редакцию 13.01.2016 г.

Принята к печати 12.04.2016 г.

Изучен состав минеральных ассоциаций основных разновидностей пород, слагающих метаморфизованный Кандалакшский габбро-анортозитовый массив на юге Кольского полуострова. Клинопироксен по составу соответствует диопсиду, реже фассаиту, а ортопироксен – бронзиту и гиперстену. Гранат, развитый в виде реакционных кайм на границе пироксен-плаггиоклаз, принадлежит пиральспитовой группе состава *Alm-Prp-Grs*. Плаггиоклаз соответствует андезину и лабрадору. По данным микронзондового профилирования реликтовые зерна клинопироксена характеризуются гомогенным составом. Для граната из реакционной каймы, развитой между клинопироксеном и плаггиоклазом, выявлены возрастание содержания СаО и снижение концентраций MgO при приближении к границе с плаггиоклазом. Крупные реликтовые зерна плаггиоклаза среди гранулированной матрицы характеризуются слабой деанортитизацией краевых частей. Расчеты по гранат-клинопироксеновым термометрам и барометрам для большинства образцов показали значения температур минеральных равновесий 830–910°C и давление около 10 кбар, которые соответствуют изобарическим условиям гранулитовой фации метаморфизма, проявленным около 1.9 млрд лет назад в процессе коллизии Кандалакшско-Колвицкой гранулитовой зоны.

Ключевые слова: Кандалакшский габбро-анортозитовый массив, клинопироксен, гранат, плаггиоклаз, микронзондовые профили, гранат-клинопироксеновые термометры и барометры, P-T условия.

ВВЕДЕНИЕ

Кольская провинция Балтийского (Фенноскандинавского) щита – уникальная область развития полихронных интрузий так называемых “автономных” анортозитов, залегающих в различных структурных обстановках. Наиболее древними (неоархейскими) являются массивы, развитые по периферии Кейвской парагнейсовой структуры: Цагинский, Ельскоозерский, Медвежьеозерский, Пачинский, Ачинский, Магазин-Мусюр и Потчеварек (рис. 1а). Частично размещение этих интрузий контролируется зонами глубинных разломов по границе Кейвской структуры с Мурманским и Кольским блоками (см. рис. 1а). Их возраст, определенный U-Pb методом по циркону, составляет 2660–2680 млн лет [3, 6]. Характерная минерагеническая особенность этих интрузий – наличие окисной V-Ti-Fe рудной минерализации, локализованной в ряде месторождений и проявлений [25].

Палеопротерозойские анортозитовые массивы образуют две возрастные группы. Более древние из них (сумийские) маркируют зону сочленения Кольского блока и Беломорского подвижного

пояса (1), развиты вдоль северо-восточного контакта Лапландской гранулитовой зоны (2), а также в пределах Кандалакшско-Колвицкой зоны (3) единого Лапландско-Колвицкого гранулитового пояса (см. рис. 1а). Первые представлены массивами Чуна-Волчьих-Лосевых тундр комплекса Главного хребта с U-Pb возрастными около 2470 млн лет [17, 22], вторые – массивом Пыршин, U-Pb возраст которого равен 2452 ± 7 млн лет [12, 13], а также Кандалакшским и Колвицким массивами. Возраст последнего, определенный U-Pb методом, составляет 2450 ± 10 млн лет [12] и 2462 ± 7 млн лет [20]. С отдельными интрузиями этого возраста (Волчьетундровский массив) связана малосульфидная платинометаллическая минерализация, имеющая промышленные масштабы [23].

Более молодые (свекофенские) интрузии анортозитов приурочены исключительно к Лапландской зоне гранулитов и развиты как в ее южной (нижней) части, так и в пределах северо-восточного контакта (см. рис. 1а). Возраст Яврозерского массива из южной части Лапландских гранулитов определен U-Pb методом по циркону в 1945 ± 8 млн лет [15], а внедрение массива Вулвара зоны северо-

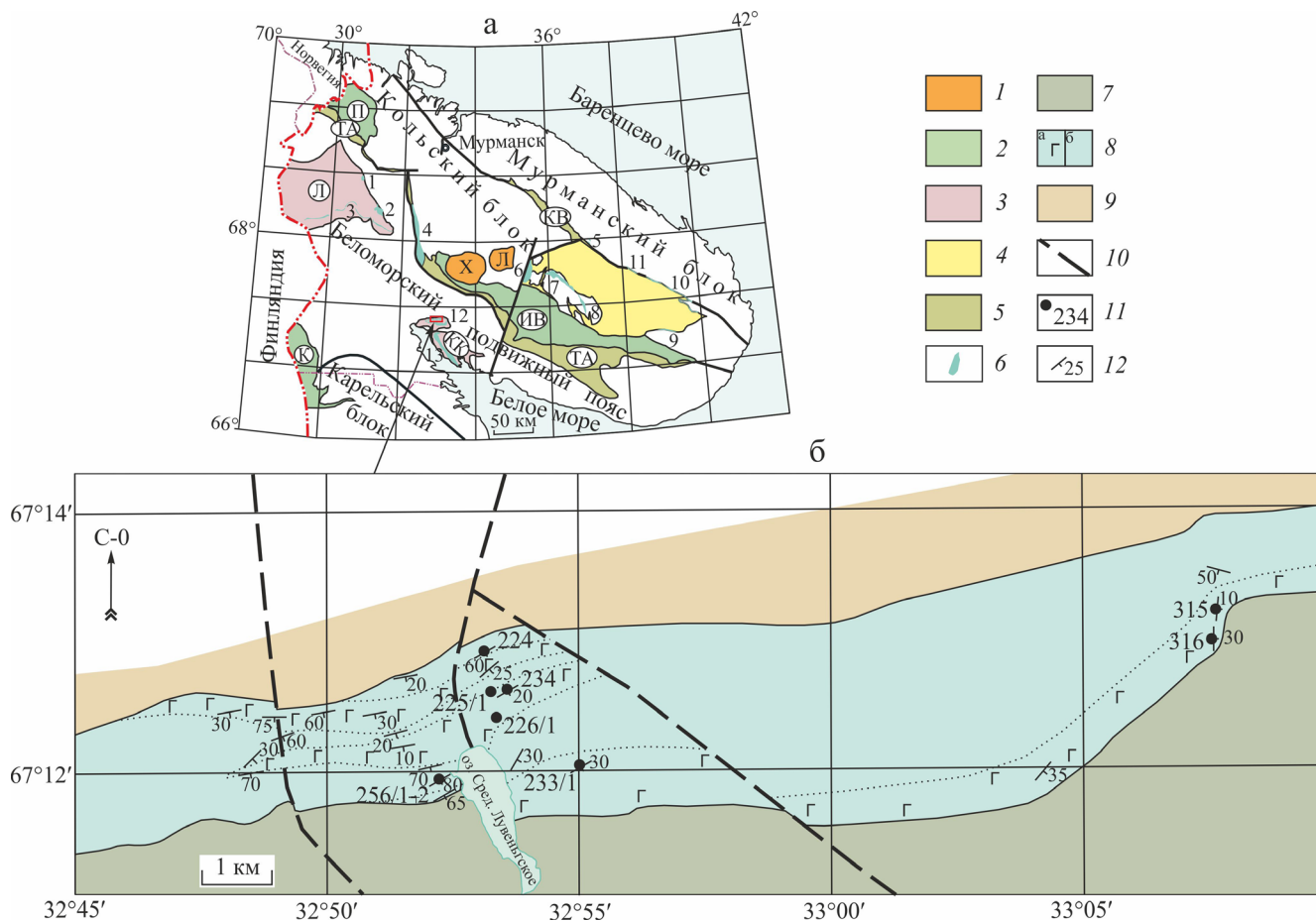


Рис. 1. Геологическая схема Кольского полуострова (а) и западной части северного крыла Кандалакшского габбро-анортозитового массива (б).

1 – палеозойские интрузии щелочных нефелиновых сиенитов: Хибинский (Х), Ловозерский (Л); 2 – палеопротерозойские рифтогенные структуры: Печенгская (П), Имандра-Варзугская (ИВ), Куолярвинская (К); 3 – палеопротерозойские гранулитовые зоны: Лапландская (Л) и Кандалакшско-Колвицкая (КК) Лапландско-Колвицкого гранулитового пояса; 4 – Кейвская структура; 5 – позднеархейские зеленокаменные пояса: Колмозеро-Воронинский (КВ), Терско-Аллареченский (ТА); 6 – массивы автономных анортозитов: Вулвара (1), Пыршин (2), южной зоны Лапландских гранулитов (3), Главного хребта (4), Потчевварек (5), Цагинский (6), Ельскоозерский (7), Медвежьеозерский (8), Пачинский (9), Ачинский (10), Магазин-Мусюр (11), Кандалакшский (12), Колвицкий (13); 7 – плоскотундровская толща гранат-плагиоклаз-двупироксеновых и гранат-клинопироксен-плагиоклазовых кристаллосланцев; 8 – Кандалакшский габбро-анортозитовый массив: лейкократовые метагаббро, метагаббронориты и бластомилониты по ним (а), метаанортозиты и бластокатаклазиты по ним (б); 9 – кандалакшская толща гранатовых амфиболитов; 10 – разрывные нарушения; 11 – пробы и их номера; 12 – элементы залегания сланцеватости и полосчатости.

Fig. 1. Geological scheme of the Kola Peninsula (a) and the western part of northern limb of the Kandalaksha gabbro-anorthosite massif (b).

1 – Paleozoic intrusions of alkaline nepheline syenites: Khibiny (X), Lovozero (L); 2 – Paleoproterozoic riftogenic structures: Pechenga (P), Imandra-Varzuga (IV), Kuolayarvin (K); 3 – Paleoproterozoic granulite zones of Lapland-Kolvitsa granulite belt: Lapland (L) and Kandalaksha-Kolvitsa (KK); 4 – Keivy structure; 5 – Late Archean greenstone belts: Kolmozero-Voron'ja (KB), Tersko-Allarechensky (TA); 6 – autonomous anorthosite massifs: Vulvara (1), Pyrshin (2), the southern zone of the Lapland granulites (3), Main Ridge (4), Potchemvarek (5), Tsaga (6), El'skoozersky (7), Medvezheozersky (8), Pachynsky (9), Achinsky (10), Magazin-Musyur (11), Kandalaksha (12), Kolvitsa (13); 7 – ploskotundrovskaya series of garnet-plagioclase-bipyroxene and garnet-clinopyroxene-plagioclase schists; 8 – Kandalaksha gabbro-anorthosite massif: leucocratic metagabbro, metagabbro-norites and blastomylonites by them (a), metaanorthosites and blastocataclases by them (b); 9 – kandalaksha series of garnet amphibolites; 10 – faults; 11 – samples and their numbers; 12 – deep and strike of schistosity and banding.

восточного контакта согласно полученным оценкам происходило в интервале 2.10–1.97 млрд лет [14]. Признаки рудной специализации интрузий габбро-анортозитов этого возраста не известны.

По сравнению с упомянутыми интрузиями автономных анортозитов одним из наименее изученных является Кандалакшский габбро-анортозитовый массив, чей вещественный состав и условия ме-

таморфизма до сих пор не изучены. Следует отметить, что значительно лучше исследованный Колвицкий габбро-анортозитовый массив при сходстве структурной позиции отличается от Кандалакшского массива лучшей сохранностью пород, особенно в его юго-восточной части, среди которых заметно преобладают породы ортопироксеновой ассоциации. Целью настоящей работы являлись изучение состава парагенетических минеральных ассоциаций в наименее измененных породных разновидностях Кандалакшского массива и оценка *P-T* условий их образования.

ГЕОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАНДАЛАКШСКОГО ГАББРО-АНОРТОЗИТОВОГО МАССИВА

Кандалакшский массив расположен в южной части Кольского полуострова и входит в состав Кандалакшско-Колвицкого габбро-анортозитового комплекса. Он приурочен к северо-западной части Кандалакшско-Колвицкой зоны гранулитов, являющейся фрагментом, вероятно, некогда единого Лапландско-Колвицкого гранулитового пояса (орогена) (см. рис. 1а). Массив залегает на породах кандалакшской толщи, расположенных в основании Кандалакшско-Колвицкой гранулитовой зоны и представленных преимущественно плагиоамфиболитами, большей частью гранатовыми, иногда с клинопироксеном (метабазами) с подчиненным количеством гранат-биотит-амфиболовых и гранат-амфибол-биотитовых плагиогнейсов (метаандезитов). Установлено, что аналогичные породы кандалакшской толщи, развитые в основании Лапландской гранулитовой зоны, метаморфизованы в условиях высокотемпературной амфиболитовой фации [16]. Возраст метаандезитов толщи из южного крыла Кандалакшской структуры (район горы Окатьево), определенный U-Pb методом по циркону, равен 2467 ± 3 млн лет [2]. Кандалакшский массив перекрывается гранат-клинопироксен-плагиоклазовыми, реже гранат-двупироксен-плагиоклазовыми кристаллосланцами (основными гранулитами) плоскотундровской толщи (см. рис. 1б), метаморфизованными в условиях гранулитовой фации.

Кандалакшский массив представляет собой пластовое тело, протягивающееся в субширотном направлении на расстояние около 30 км. В плане массив образует два крыла мощностью от 0.5 до 4.0 км каждое с преимущественно встречным падением полосчатости и сланцеватости пород под углами $15-60^\circ$ с образованием **центриклинального замыкания** на западе массива, что свидетельствует о его мульдобразной форме в разрезе. По лейкократовому метагаббро из южного крыла массива U-Pb методом по единичному циркону получен возраст, равный 2453.5 ± 4.8 млн лет (устное сообще-

ние Т.Б. Баяновой), а по лейкогаббро из северного крыла массива минеральный изохронный возраст, определенный Sm-Nd методом, равен 1886 ± 37 млн лет и интерпретируется как возраст гранулитового метаморфизма [18].

В зоне эндоконтакта Кандалакшского массива видимой мощностью первые метры развиты мезократовые метанориты. Основной объем интрузии, судя по ее разрезу в наиболее обнаженной части северного крыла в районе оз. Сред. Лувеньгское (см. рис. 1б), слабо дифференцирован и представлен чередованием прослоев в разной степени катаклазированных и милонитизированных метаноритов и лейкократовых метагаббро мощностью от 200–300 м до 1–2 км (см. рис. 1б). Большая часть пород массива сложена линзовидно-тонкополосчатыми blastokataklazитами и blastomylonитами гранат-плагиоклазового и гранат-пироксен-плагиоклазового состава (рис. 2а, б). Иногда среди них встречаются небольшие участки катаклазированных метагаббро, метагабброноритов, реже метаноритов, которые характеризуются гранобластовыми структурами с хорошо выраженными реакционными каймами граната на границе клинопироксена и плагиоклаза (рис. 2в), реже коронитовыми клинопироксен-гранатовыми каймами на границе ортопироксен-плагиоклаза. Еще реже встречаются небольшие участки, мощностью обычно не более 10 м, не затронутые процессами катаклаза и расщепления, в которых наблюдаются относительно свежие лейкогаббро, сохранившие реликты первично магматических структур (рис. 2г). В таких участках исходные текстуры соответствуют кумулятивному, характерному для интрузивных образований, где минералом кумулуса является плагиоклаз, затронутый бластезом по краям зерен, а интерстиции между ним выполнены клинопироксеном. На границе клинопироксен-плагиоклаза здесь также развиты тонкие прерывистые реакционные каймы граната (см. рис. 2г).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования выбран наиболее представительный разрез вкрест простирания пород Кандалакшского габбро-анортозитового массива в районе оз. Сред. Лувеньгское, а также отдельные породы по латерали верхней части массива (см. рис. 1б). Были выполнены микрозондовые анализы породообразующих минералов из лейкогаббро, катаклазированных лейкократовых метагаббро, лейкократовых метаноритов и метагабброноритов, а также blastokataklazитов по лейкократовому метагаббро и метаанортозитам. Химический состав минералов изучался рентгеноспектральным методом при помощи электроннозондового микроанализатора Cameca MS-46 при следующих условиях: ускоряющее напряжение 22 кВ, ток зонда

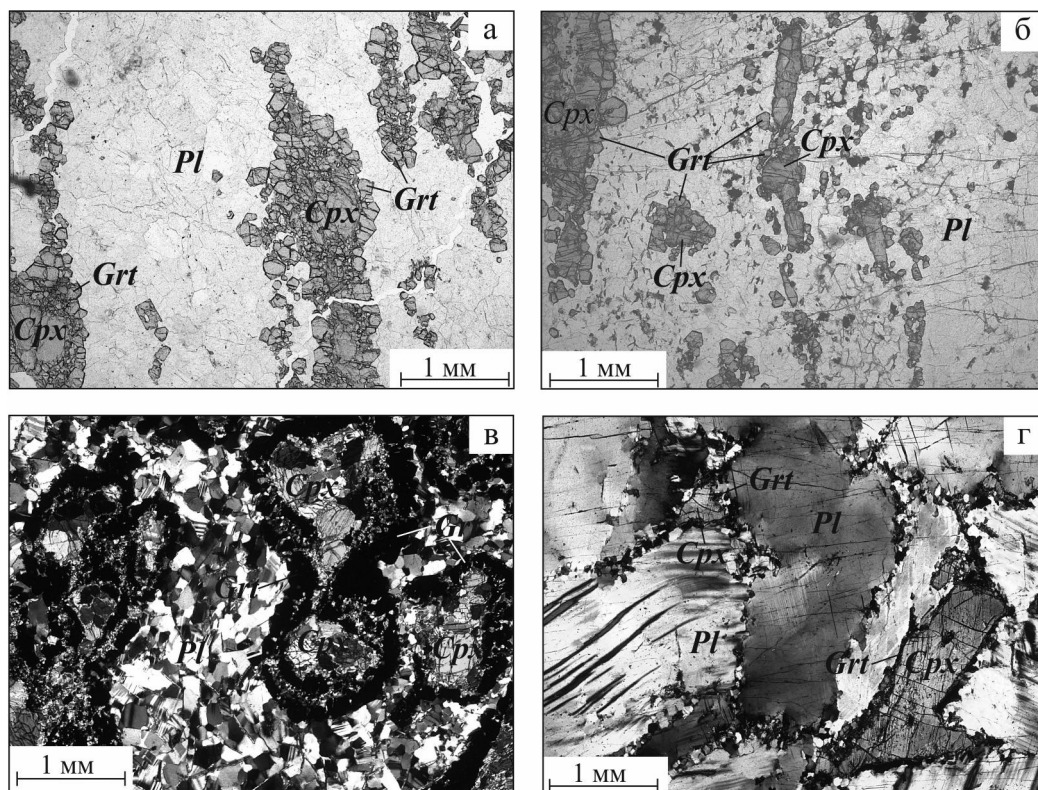


Рис. 2. Микрофотографии шлифов пород Кандалакшского габбро-анортозитового массива.

а – бластокатаклазит по лейкократовому метагаббро с каймами граната на границе клинопироксен-плагиоклаз (шлиф 315); б – бластокатаклазит по клинопироксен-гранатовому метаанортозиту (шлиф 224); в – катаклазированное метагаббро с каймами граната вокруг клинопироксена (шлиф 256/2); г – лейкогаббро с кумулюсным плагиоклазом, интеркумулюсным клинопироксеном и тонкими каймами граната на границе клинопироксен-плагиоклаз (шлиф 225/1). Здесь и на рис. 3, 6–11, в тексте и таблицах – символы минералов по [36].

Fig. 2. Photomicrographs of thin sections from the rocks of Kandalaksha gabbro-anorthosite massif.

а – blastocataclasite on leucocratic metagabbro with garnet rims on the boundary clinopyroxene-plagioclase (thin section 315); б – blastocataclasite on clinopyroxene-garnet metaanorthosite (thin section 224); в – cataclastic metagabbro with garnet rims around clinopyroxene (thin section 256/2); г – leucogabbro with cumulus plagioclase, intercumulus clinopyroxene and thin garnet rims on the boundary clinopyroxene-plagioclase (thin section 225/1). Here, in fig. 3, 6–11, in the text and table – the mineral symbols by [36].

30–40 нА. В качестве эталонов использовались искусственные и природные соединения: Si, Ca (волластонит), Al ($Y_3Al_5O_{12}$), Na, Ti (лоренценит), Mg (форстерит), Fe (гематит), Mn ($MnCO_3$) и К (вадеит). Микрозондовое профилирование граната из каймы, реликтовых зерен клинопироксена и плагиоклаза производилось с шагом 2.0, 2.5 и 4.0 мкм соответственно.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ И ОЦЕНКА *P-T* УСЛОВИЙ МЕТАМОРФИЗМА

Результаты исследования приведены в табл. 1, 2 и показаны на рис. 3–12.

Клинопироксен из лейкогаббро образует зерна неправильной формы размером до 2.0×1.5 мм (см. рис. 2г), содержащие недиагностируемые тончай-

шие пластинки, вероятно, ламелли ортопироксена. По соотношению кальция, магния и железа и, следовательно, главных миналов этот клинопироксен относится к диопсиду ($En_{39.5}Wo_{48.5}Fs_{12.0}$) (см. рис. 3). Отдельные зерна клинопироксенов из катаклазированных метагабброидов и бластокатаклазитов по ним имеют изометричную полигональную форму и размер от 0.1 и меньше до 0.3 мм в поперечнике. По химическому составу они соответствуют ряду диопсид-фассаит, причем клинопироксены из катаклазированных метагаббро и метагабброноритов, а также одного образца бластокатаклазита по лейкократовому метагаббро (обр. 234, см. табл. 1) отвечают диопсиду ($En_{43.2-44.1}Wo_{47.2-48.0}Fs_{8.8-9.4}$) (см. рис. 3), а из катаклазированного лейкократового метагаббро и бластокатаклазита по метаанортозиту – фассаиту ($En_{37.0-41.5}Wo_{50.5-51.1}Fs_{8.0-11.9}$) (см. рис. 3). Один клинопироксен из бластомилонита по лейкократовому

Таблица 1. Химические составы (мас. %) и формульные единицы сосуществующих минералов из пород Кандалакшского габбро-анортозитового массива**Table 1.** Chemical compositions (wt. %) and crystallochemical formula of coexisting minerals from the Kandalaksha gabbro-anorthosite massif rocks

Компо- нент	№ пробы													
	1(225/1)			2(233/1)			3(316)			4(226/1)			5(256/1)	
	<i>Cpx</i>	<i>Gr</i>	<i>Pl</i>	<i>Cpx</i>	<i>Gr</i>	<i>Pl</i>	<i>Cpx</i>	<i>Gr</i>	<i>Pl</i>	<i>Opx</i>	<i>Gr</i>	<i>Pl</i>	<i>Opx</i>	<i>Cpx</i>
SiO ₂	52.99	38.61	53.92	49.18	39.07	53.43	51.45	39.48	57.52	53.48	39.56	56.13	55.65	53.88
TiO ₂	0.26	0.05	0.00	0.58	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	3.09	20.33	29.28	6.16	21.83	28.07	4.47	21.64	26.10	1.85	21.14	27.04	1.72	4.63
FeO	7.03	20.25	0.06	6.13	18.87	0.05	6.85	20.30	0.07	20.62	22.68	0.03	11.99	4.67
MnO	0.05	0.72	0.00	0.06	0.38	0.00	0.07	0.49	0.00	0.14	0.39	0.00	0.08	0.06
MgO	13.06	6.08	0.00	12.23	8.23	0.00	12.06	9.89	0.00	23.53	9.89	0.00	29.65	13.36
CaO	22.34	12.18	11.94	22.56	10.78	11.24	23.15	7.97	9.05	0.17	5.72	9.61	0.28	19.88
Na ₂ O	1.41	0.00	4.71	0.88	0.00	5.04	0.67	0.00	6.10	0.00	0.00	6.25	0.00	2.31
K ₂ O	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.23	0.02	0.00	0.25	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00
Сумма	100.23	98.22	99.70	97.78	99.16	98.06	99.14	99.77	99.08	99.79	99.36	99.12	99.37	98.92
Ионы*	6	12	8	6	12	8	6	12	8	6	12	8	6	6
Si	1.956	3.030	2.440	1.861	2.993	2.462	1.922	3.000	2.599	1.970	3.030	2.544	1.977	1.978
Al ^{IV}	0.044	—	—	0.139	—	—	0.078	—	—	0.030	—	—	0.023	0.022
Al ^{VI}	0.091	—	—	0.136	—	—	0.119	—	—	0.050	—	—	0.049	0.178
Al _{общ}	0.134	1.881	1.562	0.275	1.971	1.525	0.197	1.939	1.391	0.080	1.909	1.445	0.072	0.200
Ti	0.007	0.003	0.000	0.017	0.000	0.000	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	0.217	1.329	0.002	0.194	1.209	0.002	0.214	1.290	0.003	0.635	1.453	0.001	0.356	0.143
Mn	0.002	0.048	0.000	0.002	0.025	0.000	0.002	0.032	0.000	0.004	0.025	0.000	0.002	0.002
Mg	0.719	0.711	0.000	0.690	0.940	0.000	0.671	1.120	0.000	1.292	1.129	0.000	1.570	0.731
Ca	0.884	1.024	0.564	0.915	0.885	0.555	0.927	0.649	0.438	0.007	0.469	0.467	0.011	0.782
Na	0.101	0.000	0.413	0.065	0.000	0.450	0.049	0.000	0.535	0.000	0.000	0.549	0.000	0.164
K	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.014	0.001	0.000	0.014	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000
X _{Fe}	0.23	0.65	—	0.22	0.56	—	0.24	0.54	—	0.33	0.56	—	0.19	0.16
X _{An}	—	—	0.57	—	—	0.55	—	—	0.44	—	—	0.46	—	—
En	39.5	—	—	38.3	—	—	37.0	—	—	66.6	—	—	81.0	44.1
Fs	12.0	—	—	10.9	—	—	11.9	—	—	33.0	—	—	18.5	8.8
Wo	48.5	—	—	50.8	—	—	51.1	—	—	0.4	—	—	0.5	47.2
Alm	—	42.7	—	—	39.5	—	—	41.8	—	—	47.2	—	—	—
Pyr	—	22.9	—	—	30.7	—	—	36.2	—	—	36.7	—	—	—
Gross	—	32.9	—	—	29.0	—	—	21.0	—	—	15.3	—	—	—
Spes	—	1.5	—	—	0.8	—	—	1.0	—	—	0.8	—	—	—
Ab	—	—	42.1	—	—	44.2	—	—	54.1	—	—	53.9	—	—
An	—	—	57.4	—	—	54.5	—	—	44.4	—	—	45.8	—	—
Or	—	—	0.5	—	—	1.3	—	—	1.5	—	—	0.3	—	—
Компо- нент	5(256/1)		6(256/2)			7(224)			8(234)			9(315)		
	<i>Gr</i>	<i>Pl</i>	<i>Cpx</i>	<i>Gr</i>	<i>Pl</i>	<i>Cpx</i>	<i>Gr</i>	<i>Pl</i>	<i>Cpx</i>	<i>Gr</i>	<i>Pl</i>	<i>Cpx</i>	<i>Gr</i>	<i>Pl</i>
SiO ₂	40.40	57.61	54.19	40.37	56.81	51.71	39.24	53.85	51.84	39.90	53.26	53.11	39.51	52.37
TiO ₂	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00	0.35	0.09	0.00	0.15	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	21.77	26.54	5.22	21.75	26.55	5.33	21.98	28.16	4.19	22.27	27.87	2.40	22.08	29.50
FeO	16.13	0.00	5.17	19.43	0.05	4.47	13.84	0.06	5.11	16.11	0.05	5.43	19.31	0.08
MnO	0.26	0.00	0.04	0.28	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.20	0.00	0.07	0.56	0.00
MgO	11.99	0.00	13.42	10.20	0.00	12.95	8.28	0.00	14.12	11.82	0.00	13.97	10.40	0.00
CaO	8.40	8.61	20.45	6.69	9.54	21.95	14.94	11.05	21.79	8.76	11.33	23.75	7.17	13.74
Na ₂ O	0.00	6.30	2.26	0.00	6.56	1.58	0.00	5.54	1.16	0.00	4.70	0.45	0.00	3.92
K ₂ O	0.00	0.07	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.25	0.02	0.00	0.16
Сумма	98.95	99.13	101.12	98.72	99.64	98.34	98.59	98.80	98.36	99.06	97.46	99.45	99.03	99.76
Ионы*	12	8	6	12	8	6	12	8	6	12	8	6	12	8
Si	3.032	2.596	1.952	3.065	2.564	1.922	2.988	2.464	1.931	2.996	2.467	1.965	3.003	2.386
Al ^{IV}	—	—	0.048	—	—	0.078	—	—	0.069	—	—	0.035	—	—
Al ^{VI}	—	—	0.174	—	—	0.158	—	—	0.115	—	—	0.070	—	—
Al _{общ}	1.926	1.410	0.222	1.947	1.412	0.233	1.973	1.519	0.184	1.971	1.522	0.105	1.979	1.584
Ti	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.010	0.005	0.000	0.004	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000
Fe	1.013	0.000	0.156	1.234	0.002	0.139	0.881	0.002	0.159	1.012	0.002	0.168	1.228	0.003

Таблица 1. Окончание

Table 1. Ending

Компо- нент			6(256/2)			7(224)			8(234)			9(315)		
	<i>Gr</i>	<i>Pl</i>	<i>Cpx</i>	<i>Gr</i>	<i>Pl</i>	<i>Cpx</i>	<i>Gr</i>	<i>Pl</i>	<i>Cpx</i>	<i>Gr</i>	<i>Pl</i>	<i>Cpx</i>	<i>Gr</i>	<i>Pl</i>
Mn	0.017	0.000	0.001	0.018	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000	0.013	0.000	0.002	0.036	0.000
Mg	1.341	0.000	0.721	1.154	0.000	0.717	0.940	0.000	0.784	1.323	0.000	0.770	1.178	0.000
Ca	0.675	0.416	0.789	0.544	0.461	0.874	1.219	0.542	0.870	0.705	0.532	0.942	0.584	0.671
Na	0.000	0.550	0.158	0.000	0.574	0.114	0.000	0.491	0.084	0.000	0.422	0.032	0.000	0.346
K	0.000	0.004	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000	0.015	0.001	0.000	0.009
X _{Fe}	0.43	—	0.18	0.52	—	0.16	0.48	—	0.17	0.43	—	0.18	0.51	—
X _{An}	—	0.43	—	—	0.44	—	—	0.52	—	—	0.56	—	—	0.65
<i>En</i>	—	—	43.2	—	—	41.5	—	—	43.2	—	—	40.9	—	—
<i>Fs</i>	—	—	9.4	—	—	8.0	—	—	8.8	—	—	9.1	—	—
<i>Wo</i>	—	—	47.4	—	—	50.5	—	—	48.0	—	—	50.0	—	—
<i>Alm</i>	33.3	—	—	41.8	—	—	28.8	—	—	33.2	—	—	40.6	—
<i>Pyr</i>	44.0	—	—	39.1	—	—	30.8	—	—	43.3	—	—	38.9	—
<i>Gross</i>	22.2	—	—	18.5	—	—	39.9	—	—	23.1	—	—	19.3	—
<i>Spes</i>	0.5	—	—	0.6	—	—	0.5	—	—	0.4	—	—	1.2	—
<i>Ab</i>	—	56.7	—	—	55.1	—	—	47.2	—	—	42.2	—	—	33.7
<i>An</i>	—	42.9	—	—	44.2	—	—	52.0	—	—	56.3	—	—	65.4
<i>Or</i>	—	0.4	—	—	0.7	—	—	0.8	—	—	1.5	—	—	0.9

Примечание. 1 – лейкогаббро; 2, 3 – лейкократовое метагаббро катаклазированное; 4 – лейкократовый метанорит катаклазированный; 5 – метагаббронорит катаклазированный; 6 – метагаббро катаклазированное; 7 – бластокатаклазит по клинопироксен-гранатсодержащему метаанортозиту; 8, 9 – бластокатаклазиты по лейкократовому метагаббро. X_{Fe} = Fe/(Fe + Mg), X_{An} = An/(An + An + Or). Ионы* – ионы в пересчете на (0).

Note. 1 – leucogabbro; 2, 3 – leucocratic metagabbro cataclastic; 4 – leucocratic metanorite cataclastic; 5 – metagabbbronorite cataclastic; 6 – metagabbro cataclastic; 7 – blastocataclasite by clinopyroxene-garnetbearing metaanorthosite; 8, 9 – blastocataclasites by leucocratic metagabbro. X_{Fe} = Fe/(Fe + Mg), X_{An} = An/(An + An + Or). Ions* – ions convert to (0).

Таблица 2. Температура (°C) и давление (кбар) образования пород Кандалакшского габбро-анортозитового массива

Table 2. Formation temperature (°C) and pressure (kbar) of rocks Kandalaksha gabbro-anorthosite massif

Номер образца	Термометр						Барометр	
	<i>Cpx-Grt</i>				<i>Opx-Grt</i>		<i>Grt-Cpx</i>	<i>Grt-Opx</i>
	1	2	3	4	5	6	7	8
225/1	845	832	825	751	—	—	9.8	—
233/1	904	893	896	800	—	—	9.8	—
316	915	901	892	815	—	—	8.3	—
226/1	—	—	—	—	802	926	8.4	10.5
256/1	901	888	881	766	—	—	9.9	—
256/2	785	766	732	660	—	—	7.8	—
224	983	977	964	845	—	—	12.5	—
234	918	906	903	783	—	—	9.5	—
315	804	786	758	685	—	—	7.2	—
Среднее	882 ± 66	869 ± 70	856 ± 79	763 ± 63	—	—	9.2 ± 1.6	—

Примечание. Термометры: 1 – [29], 2 – [35], 3 – [32], 4 – [33], 5 – [31], 6 – [9]. Барометры: 7 – [34], 8 – [28].

Note. Thermometers: 1 – [29], 2 – [35], 3 – [32], 4 – [33], 5 – [31], 6 – [9]. Barometers: 7 – [34], 8 – [28].

метагаббро (обр. 315, см. табл. 1) по химическому составу располагается на границе диопсид-фассаит (*En*_{40.9}*Wo*_{50.0}*Fs*_{9.1}) (см. рис. 3).

Для клинопироксенов Кандалакшского массива характерен узкий диапазон колебаний железистости, значения которой варьируют от 0.16 до 0.24 (см. табл. 1). Снизу вверх по разрезу массива состав клинопироксенов закономерно обогащает-

ся железом: от 4.47 мас. % (обр. 224, см. табл. 1) до 6.13 и 6.85 мас. % (обр. 233/1 и 316 соответственно, см. табл. 1). Исключением является клинопироксен из лейкогаббро нижней части массива (обр. 225/1, см. табл. 1, рис. 1), в котором содержание железа максимальное. Тем не менее полученная особенность эволюции состава клинопироксенов свидетельствует о скрытой расслоен-

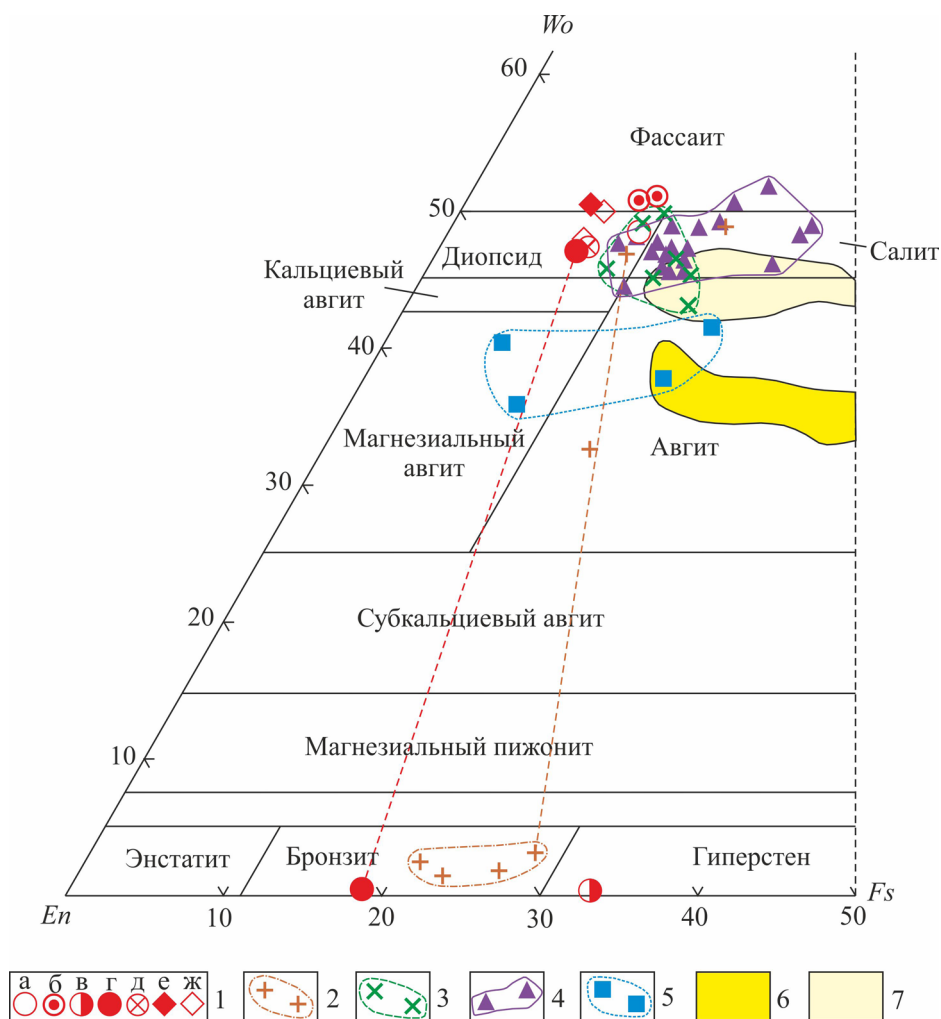


Рис. 3. Классификационная диаграмма *En-Wo-Fs* [7] для пироксенов из пород Кандалакшского габбро-анортозитового массива в сравнении с палеопротерозойскими автономными анортозитами Кольского региона.

Здесь и на рис. 4, 5: 1 – фигуративные точки составов пироксенов Кандалакшского габбро-анортозитового массива из пород: лейкогаббро (а), катаклазированного лейкократового метагаббро (б), катаклазированного лейкократового метанорита (в), катаклазированного метагаббронорита (г), катаклазированного метагаббро (д), бластокатаклазита по клинопироксен-гранатсодержащему метаанортозиту (е), бластокатаклазита по лейкократовому метагаббро (ж); 2–5 – поля фигуративных точек составов пироксенов: 2 – Колвицкого массива [8, 24, 25], 3 – массива Вуим-Элгорас южной зоны Лапландских гранулитов [25], 4 – массива Пыршин [14], 5 – Волчегундрового массива комплекса Главного хребта [21]; 6, 7 – поля составов магматических (6) и метаморфических (7) клинопироксенов массива Адирондак [27].

Fig. 3. *En-Wo-Fs* classificational diagram [7] for pyroxenes from the rocks of Kandalaksha gabbro-anorthosite massif compared to Kola region Paleoproterozoic autonomous anorthosites.

Here and in fig. 4, 5: 1 – figurative points of pyroxene compositions from rocks of Kandalaksha anorthosites massif: leucogabbro (a), leucocratic cataclastic metagabbro (б), leucocratic cataclastic metanorite (в), cataclastic metagabbronorite (г), cataclastic metagabbro (д), blastocataclasite on clinopyroxene-garnetbearing metaanorthosite (е), blastocataclasite on leucocratic metagabbro (ж); 2–5 – fields of the figurative points pyroxenes compositions: 2 – Kolvitsa massif [8, 24, 25], 3 – Vuim-Elgoras massif from the southern zone of the Lapland granulites [25], 4 – Pyrshin massif [14], 5 – Volchetundra massif of the Main Ridge complex [21]; 6, 7 – the field of magmatic (6) and metamorphic (7) clinopyroxenes composition, Adirondack massif [27].

ности в массиве и в целом о его направленном за-
твердевании.

Содержания титана, алюминия и натрия в клинопироксенах Кандалакшского массива характеризуются сравнительно широкими диапазонами (мас. %): TiO_2 – 0.00–0.58, Al_2O_3 – 2.24–6.16 и Na_2O – 0.45–2.31 (см. табл. 1). На диаграмме связи

железистости с концентрациями петрогенных компонентов (см. рис. 4) содержания Ti имеют с железистостью слабую положительную корреляцию, Na – отрицательную, а между железистостью и количеством Al корреляция отсутствует. Между содержаниями Na и Al^{VI} , который служит показателем давления [26], в клинопироксенах Кандалакш-

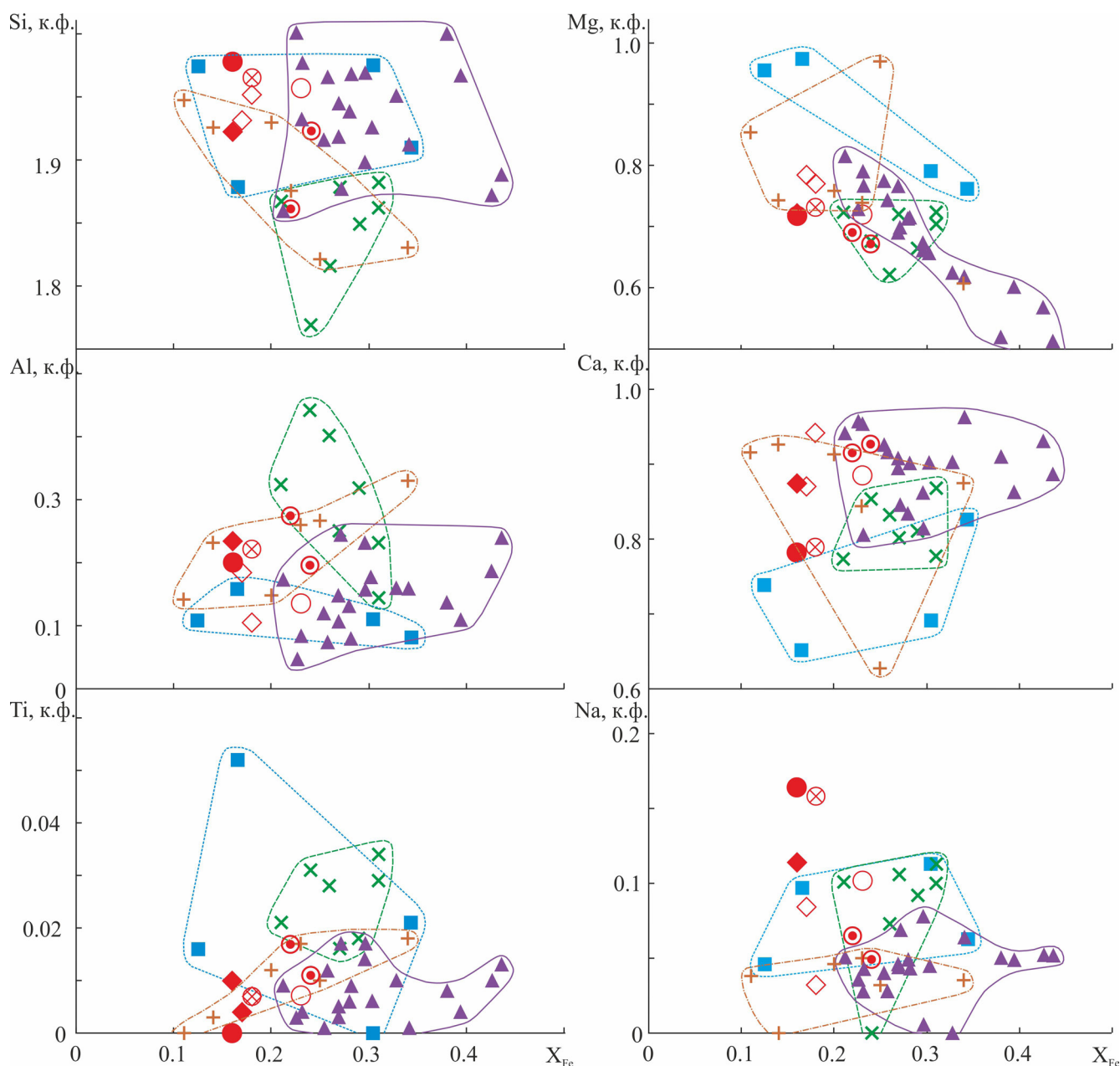


Рис. 4. Диаграммы связи петрогенных элементов с железистостью X_{Fe} клинопироксенов Кандалакшского габбро-анортозитового массива и палеопротерозойских интрузий автономных анортозитов Кольского региона.

Fig. 4. Diagrams of major elements versus X_{Fe} in clinopyroxenes from Kandalaksha gabbro-anorthosite massif and Paleoproterozoic intrusions autonomous anorthosite Kola region.

ского массива обнаруживается отчетливая положительная корреляция, что свидетельствует о присутствии в их составе жадеитовой молекулы. Она является признаком сравнительно высокого давления метаморфизма (см. рис. 5).

Микрозондовое профилирование зерна клинопироксена из лейкогаббро (шлиф 225/1) показало, что он имеет гомогенный состав и только в узкой полосе шириной около 50 мкм, примыкающей к

кайме граната, в нем заметно снижаются содержания кальция и магния и возрастают – железа (см. рис. 6).

Ортопироксен встречен в двух породах – катаклазированном лейкократовом метанорите и метагаббронорите. В первом отдельные зерна ортопироксена изометричной полигональной формы размером 0.05–0.10 мм образуют скопления неправильной формы размером до 1 мм, часто в ассоци-

ации с рудным минералом. Во втором ортопироксен слагает ядерную часть минеральных агрегатов ортопироксен–клинопироксен–гранат размером 1–2 мм в поперечнике.

По химическому составу ортопироксен характеризуется изменчивостью содержаний магния ($\text{MgO} = 23.53$ и 29.65 мас. %, см. табл. 1) и железа ($\text{FeO} = 13.36$ и 20.62 мас. %, см. там же), при близости содержаний алюминия и кальция ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.72$ – 1.85 и $\text{CaO} = 0.17$ – 0.28 мас. %, см. табл. 1), соответствуя бронзиту в катаклазированном метагаббронорите (обр. 256/1, $\text{En}_{81.0}\text{Fs}_{18.5}\text{Wo}_{0.5}$) и гиперстену в лейкократовом метанорите (обр. 226/1, $\text{En}_{66.6}\text{Fs}_{33.0}\text{Wo}_{0.4}$) (см. рис. 3).

Гранаты в породах Кандалакшского массива образуют реакционные каймы, отделяющие клинопироксен и ортопироксен от плагиоклаза, ширина которых меняется в достаточно широких пределах. Минимальная ширина каймы, не превышающая 50 мкм, наблюдается в наиболее свежей породе – лейкогаббро (обр. 225/1, см. рис. 6). В катаклазированных метагабброидах она варьирует от 200 до 500 мкм, а в blastokataklazитах по метагабброидам обычно уменьшается до 100–300 мкм.

По химическому составу гранаты представлены *Alm-Gr_s-Prp* твердым раствором (см. рис. 7а) с резко подчиненным количеством *Sps* (см. табл. 1). Они характеризуются стабильными содержаниями алюминия: $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20.33$ – 22.27 мас. %, при более широких колебаниях остальных компонентов (мас. %): $\text{FeO} = 13.84$ – 22.68 , $\text{MnO} = 0.20$ – 0.72 , $\text{MgO} = 6.08$ – 11.99 , $\text{CaO} = 5.72$ – 14.94 (см. табл. 1). Как и для клинопироксена, отмечается отсутствие зависимости состава граната от состава пород. В частности, до-

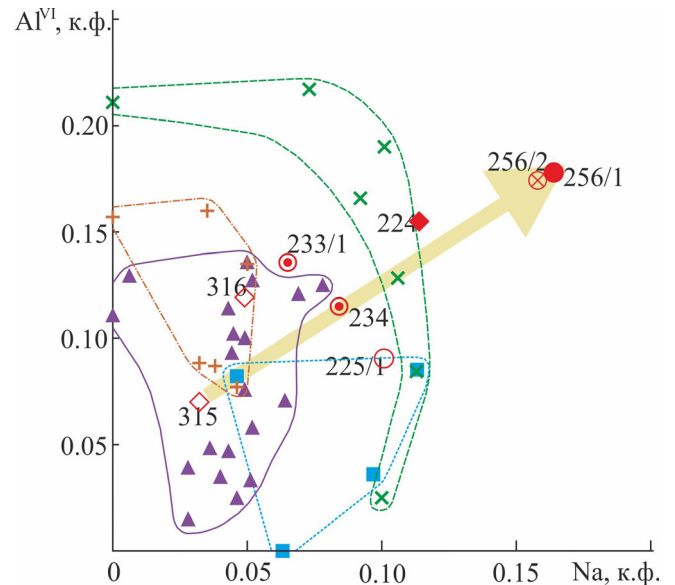


Рис. 5. Взаимосвязь между Al^{VI} и Na в клинопироксенах Кандалакшского габбро-анортозитового массива и палеопротерозойских интрузий автономных анортозитов Кольского региона.

Fig. 5. Diagram Al^{VI} versus Na in clinopyroxenes from Kandalaksha gabbro-anorthosite massif and intrusions Paleoproterozoic autonomous anorthosite Kola region.

ля пиропового минала изменяется от 23.2% в лейкогаббро (обр. 225/1), достигая максимума (44.3%) в метагабброноритах (обр. 256/1, см. табл. 1). Колебания альмандинового минала не столь значи-

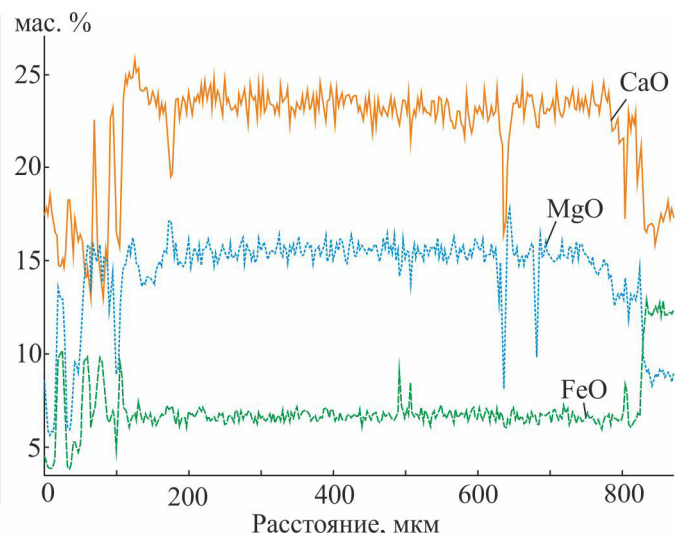
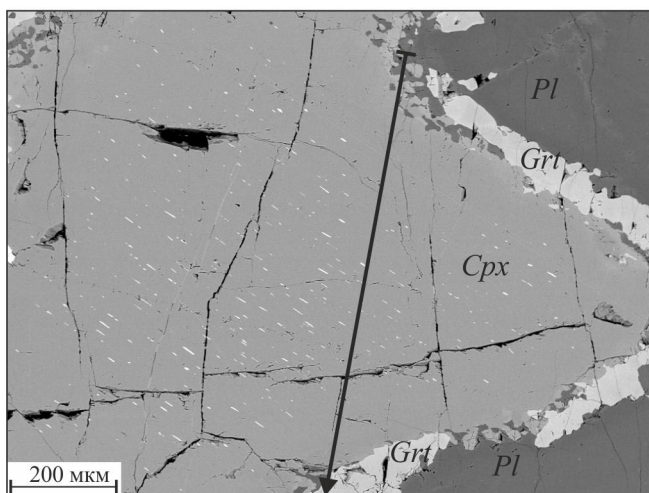


Рис. 6. Морфология и изображение зерна клинопироксена в обратно отраженных электронах из лейкогаббро (шлиф 225/1) и графики микрозондового профилирования.

Fig. 6. Morphology and image of clinopyroxene grain in the back-scattered electrons from leucogabbro (thin section 225/1) and graphs of profile microprobe.

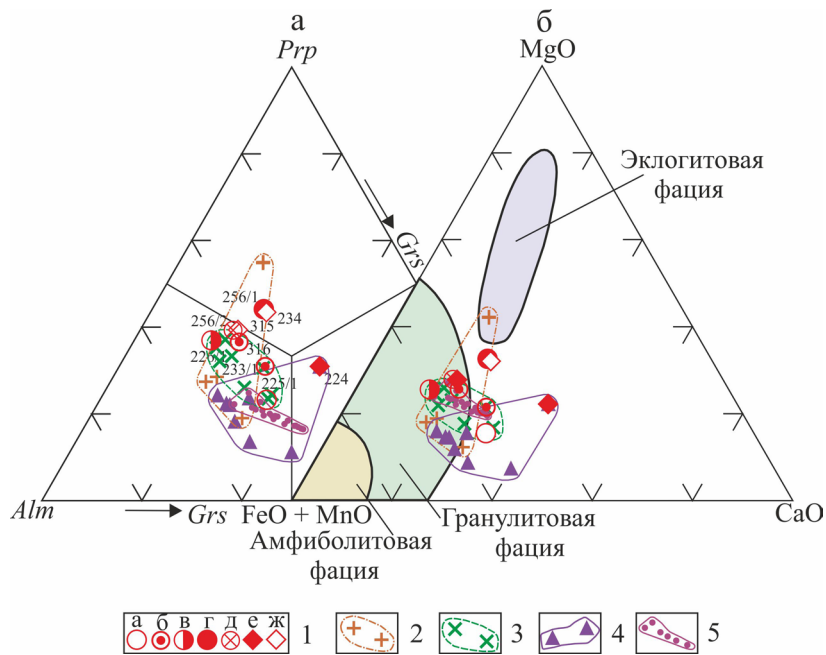


Рис. 7. Классификационная диаграмма *Alm-Prp-Sps* [30] для гранатов из пород Кандалакшского габбро-анортозитового массива и палеопротерозойских интрузий автономных анортозитов (а); положение гранатов из пород Кандалакшского габбро-анортозитового массива и палеопротерозойских интрузий автономных анортозитов на диаграмме (FeO + MnO)–MgO–CaO (б).

1 – фигуративные точки составов гранатов Кандалакшского габбро-анортозитового массива из пород: лейкогаббро (а), катаклазированного лейкократового метагаббро (б), катаклазированного лейкократового метанорита (в), катаклазированного метагаббронорита (г), катаклазированного метагаббро (д), бластокатаклазита по клинопироксен-гранатсодержащему метаанортозиту (е), бластокатаклазиту по лейкократовому метагаббро (ж); 2–5 – поля фигуративных точек составов гранатов: 2 – Колвицкого массива [8, 25], 3 – массива Вуим-Элгорас южной зоны Лапландских гранулитов [25], 4 – массива Пыршин [14], 5 – интрузий друзитов Беломорья [10]. Поля фаций метаморфизма даны по [4].

Fig. 7. *Alm-Prp-Sps* classificational diagram [30] for garnets from rocks of Kandalaksha gabbro-anorthosite massif and intrusions of Paleoproterozoic autonomous anorthosite (a); the garnet position from the rocks of Kandalaksha gabbro-anorthosite massif and intrusions of Paleoproterozoic autonomous anorthosite on the (FeO + MnO)–MgO–CaO diagram (b).

1 – figurative points of garnet compositions Kandalaksha anorthosites massif from rocks: leucogabbro (a), leucocratic cataclastic metagabbro (б), leucocratic cataclastic metanorite (в), cataclastic metagabbro (д), blastocataclasite on clinopyroxene-garnetbearing metaanorthosite (е), blastocataclasite on leucocratic metagabbro (ж); 2–5 – fields of the figurative points garnet compositions: 2 – Kolvitsa massif [8, 25], 3 – Vuim-Elgoras massif from the southern zone of the Lapland granulites [25], 4 – Pyrshin massif [14], 5 – Belomorian drusite intrusions [10]. The metamorphism facies fields, by [4].

тельны. За исключением минимального содержания (29.0%) в бластокатаклазитах по метаанортозиту (обр. 224), в остальных породах он изменяется в диапазоне 33.3–47.6% (см. табл. 1).

Химический состав граната из реакционной каймы в катаклазированном метагаббро (шл. 256/2) закономерно меняется от границы с клинопироксеном до границы с плагиоклазом. Это выражается в снижении содержания MgO, начиная с середины каймы, от 11–13 до 5–7 мас. % и возрастании – CaO с 6–7 до 15–16 мас. % на фоне слабого общего понижения содержаний FeO от 19–20 до 15–16 мас. % (см. рис. 8).

Следует отметить, что для клинопироксена и граната установлено согласованное изменение содержаний основных компонентов. Так, между концентрациями *Fs* и *Alm* наблюдается высокая поло-

жительная корреляция, несколько меньшая – между *En* и *Prp*, тогда как между *Wo* и *Grs* она отсутствует (см. рис. 9).

Плагиоклаз в метаморфизованных породах массива обычно встречается в виде изометричных полигональных агрегатов, которые образовались в процессе динамической перекристаллизации первичных изверженных кристаллов. Иногда среди гранулированной матрицы отмечаются реликты призматических кристаллов, а в лейкогаббро (обр. 225/1) плагиоклаз представлен агрегатами кристаллов размером 1–2 мм с волнистым погасанием и тонкой внешней гранулированной каймой (см. рис. 2г). По химическому составу плагиоклаз соответствует лабрадору в лейкогаббро, бластокатаклазитах по метаанортозиту и лейкократо-

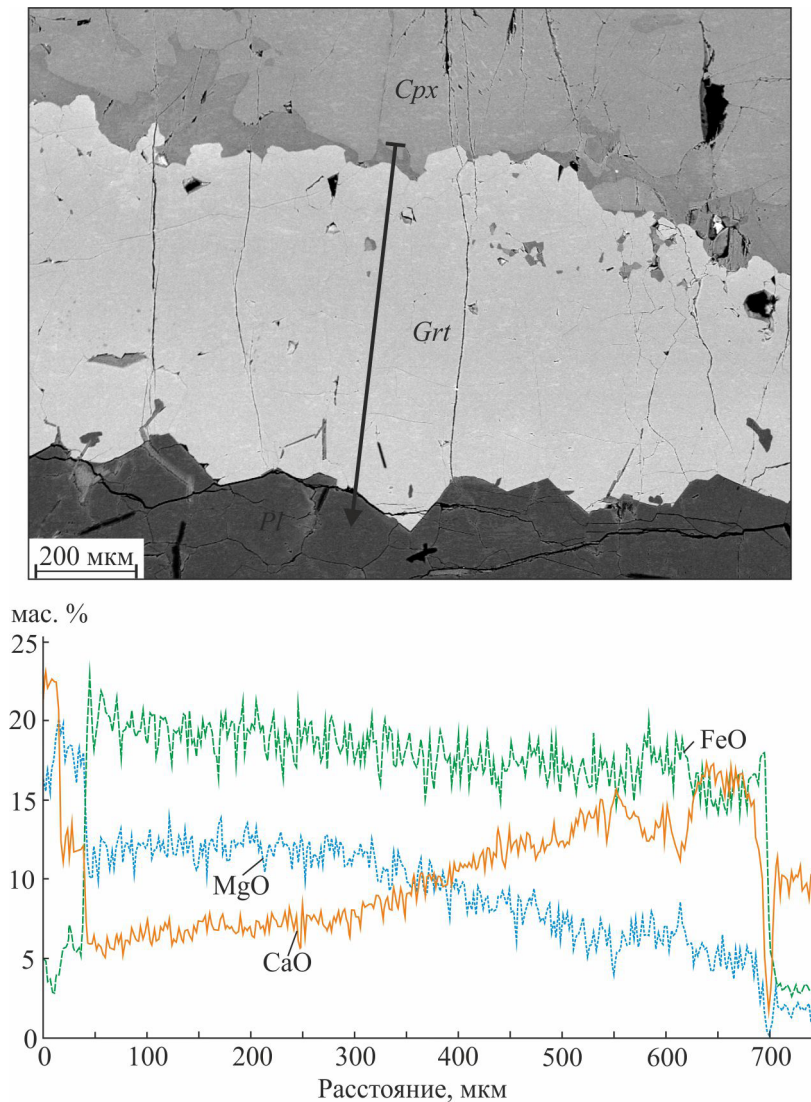


Рис. 8. Изображение зерна граната в обратно отраженных электронах из катаклазированного метагаббро (шлиф 256/2) и результаты микрозондового профилирования.

Fig. 8. Garnet grain image in the back-scattered electrons from cataclastic metagabbro (thin section 256/2) and profile microprobe results.

вому метагаббро ($An_{52.0-65.4}$) и андезину ($An_{42.9-45.8}$) в катаклазированных метагаббро, лейкократовом метагаббро и метагаббронорите (см. табл. 1, рис. 10).

Состав реликтового зерна плагиоклаза в лейкогаббро (обр. 225/1) характеризуется слабо проявленной деанортитизацией, которая выражается в снижении содержаний CaO от центра к краям с 14–16 до 11–13 мас. % (см. рис. 11).

Оценка P - T условий метаморфизма. Данные по химическому составу минеральных ассоциаций пород были использованы для оценки P - T параметров минеральных равновесий. Для этих целей применялись различные варианты существующих гранат-клинопироксеновых геотермометров [29, 32, 33, 35], два ортопироксен-гранатовых геотермометра [9, 31], а также клинопироксен-гранатовый [34] и ортопироксен-гранатовый [28] геобарометры. Результаты приведены в табл. 2.

Среди использованных клинопироксен-гранатовых геотермометров наиболее достоверные результаты получены по геотермометру Р. Пауэлла [35], что согласуется с аналогичным выводом О.В. Авченко с коллегами [1]. Геотермометр Е. Кроу Равны [33], скорее всего, систематически занижает температуру, а термометры Д.Дж. Эллиса, Д.Х. Грина [29] и Э.Дж. Кроу [32] отличаются от термометра Р. Пауэлла на 10–20° в сторону как завышения (первый), так и занижения (второй).

Наиболее свежие породы – лейкогаббро с хорошо сохранившейся магматической структурой.

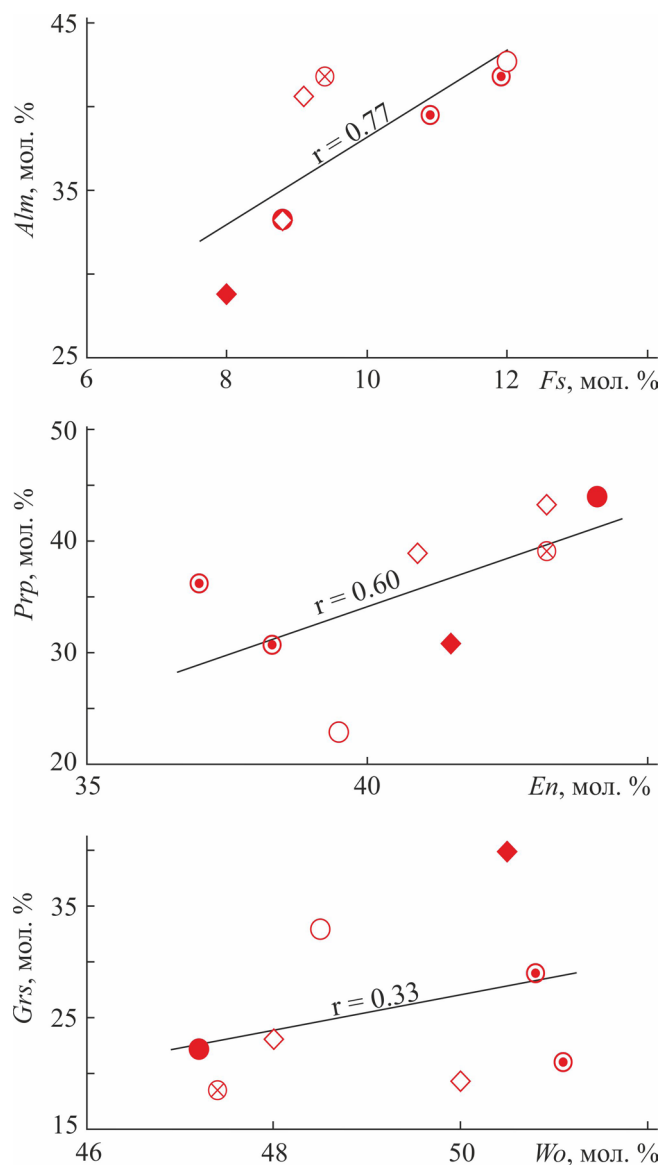


Рис. 9. Диаграммы соотношений основных минералов клинопироксенов и гранатов в породах Кандалакшского габбро-анортозитового массива.

Усл. обозначения см. на рис. 3.

Fig. 9. End member diagrams relation clinopyroxenes and garnets in the rocks of Kandalaksha gabbro-anorthosite massif.

Legend see fig. 3.

рой (обр. 225/1) – по P - T условиям не отличаются от метаморфизованных аналогов и, по-видимому, полностью утратили признаки первично магматических параметров образования. Для большинства пород Кандалакшского габбро-анортозитового массива P - T условия минеральных равновесий варьируют от 832 до 906°C и 8.3–9.8 кбар, что соответствует условиям высокobarической области гранулитовой фации метаморфизма. Для отдельных по-

род (катаклазированного метагаббро (обр. 256/2) и бластокатаклазита по лейкократовому метагаббро (обр. 315)) из верхней части массива получены более низкие параметры равновесия (766, 786°C и 7.8, 7.2 кбар соответственно, см. табл. 2), а для бластокатаклазита по метаанортозиту из основания массива (обр. 224) – повышенные (977°C и 12.5 кбар, см. табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ

Для метабазитов Кандалакшского габбро-анортозитового массива характерна минеральная ассоциация: клинопироксен ± ортопироксен + гранат + плагиоклаз, которая присуща как недеформированным лейкогаббро, так и катаклазированным метагабброидам, а также испытавшим расланцевание и перекристаллизацию blastomylonitам по метаанортозитам и лейкократовому метагаббро. При этом во всех породах массива гранат развивается в виде реакционных кайм на границе пироксен-плагиоклаз.

Сравнительный анализ составов минеральных ассоциаций палеопротерозойских интрузий автономных анортозитов. Клинопироксены рассматриваемых интрузий можно разделить на две группы по содержанию кальция. К первой относятся метаморфогенные, более кальциевые клинопироксены массивов Кандалакшский, Колвицкий, Пыршин и Вуим-Элгорас. Ко второй – менее кальциевые магматические клинопироксены Волчье-тундровского массива комплекса Главного хребта. Изученные клинопироксены Кандалакшского габбро-анортозитового массива по большинству признаков (см. рис. 3–5) наиболее близки к клинопироксенам массивов Колвицкий и Пыршин, отличаясь от них пониженной железистостью и большей концентрацией Na. Данные клинопироксены отчетливо отличаются от клинопироксенов массива метагаббро-анортозитов Вуим-Элгорас южной части Лапландской зоны гранулитов, которые характеризуются пониженными содержаниями кремнезема, повышенными – алюминия и титана, а также большей долей компонента Al^{VI} . Все эти близкие по составу метаморфогенные клинопироксены различаются содержаниями отдельных компонентов, которые обусловлены, по-видимому, разными условиями преобразований массивов и особенностями химического состава исходных магм. В частности, повышенные концентрации Al^{VI} в клинопироксенах массива Вуим-Элгорас, вероятно, отражают более высокobarические условия его метаморфизма, что свойственно фронтальной зоне Лапландских гранулитов. Среди этой группы клинопироксенов более железистые и, по-видимому, сравнительно низкотемпературные – клинопироксены массива Пыршин (см. рис. 3). Кроме того, клинопироксены массивов Кандалакшский и Пыршин являются наибо-

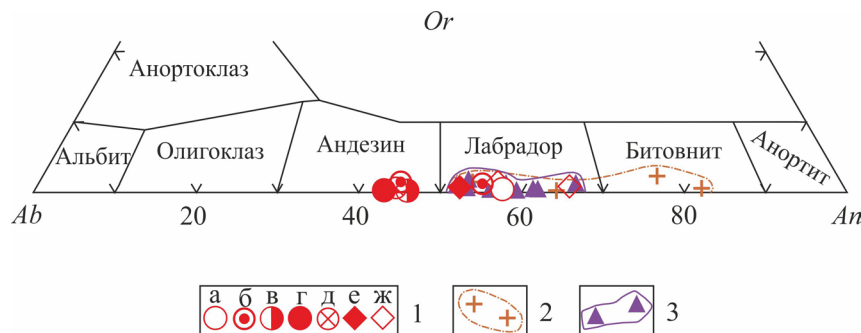


Рис. 10. Классификационная диаграмма *An-Or-Ab* для плагиоклазов из пород Кандалакшского габбро-анортозитового массива и некоторых палеопротерозойских интрузий автономных анортозитов.

1 – фигуративные точки составов плагиоклазов Кандалакшского габбро-анортозитового массива из пород: лейкогаббро (а), катаклазированного лейкократового метагаббро (б), катаклазированного лейкократового метанорита (в), катаклазированного метагаббронорита (г), катаклазированного метагаббро (д), бластокатаклазита по клинопироксен-гранатсодержащему метаанортозиту (е), бластокатаклазита по лейкократовому метагаббро (ж); 2, 3 – поля фигуративных точек составов плагиоклазов: 2 – Колвицкого массива [8, 25], 3 – массива Пыршин [14].

Fig. 10. *An-Or-Ab* classificational diagram for plagioclases from rocks of Kandalaksha gabbro-anorthosite massif and some intrusions of Paleoproterozoic autonomous anorthosite.

1 – figurative points of plagioclase compositions from the Kandalaksha anorthosites massif from rocks: leucogabbro (a), leucocratic cataclastic metagabbro (б), leucocratic cataclastic metanorite (в), cataclastic metagabbbronorite (г), cataclastic metagabbro (д), blastocataclasite on clinopyroxene-garnetbearing metaanorthosite (е), blastocataclasite on leucocratic metagabbro (ж); 2, 3 – fields of the figurative points plagioclase compositions: 2 – Kolvitsa massif [8, 25], 3 – Pyrshin massif [14].

более низкотитанистыми в отличие от таковых массивов Вуим-Элгорас, отражая особенности химического состава исходных магм.

Магматические клинопироксены Волчьегундровского массива резко отличаются от метаморфогенных принадлежностью к авгиту за счет пониженных содержаний кальция и повышенных – магния (см. рис. 3). Следует отметить, что состав клинопироксенов из габбро-пегматитов Колвицкого массива соответствует таковому магматических аналогов, а из бластокатаклазитов – метаморфогенным клинопироксенам (см. рис. 3). Аналогичная закономерность была установлена Л.Д. Ашвелом [27] при сравнении магматических и метаморфических клинопироксенов массива анортозитов Адирондак.

Составы изученных гранатов Кандалакшского массива отличаются от таковых из пород массивов Пыршин и Вуим-Элгорас более высокими содержаниями пироповой молекулы и пониженными –grossуляровой (см. рис. 7а). Кроме того, по этим же признакам они отличаются и от состава граната коронитовых кайм на границе клинопироксен-плагиоклаз в мелких интрузиях друзитов Беломорья, которые оказались наиболее близкими к гранатам массива Пыршин. Вероятно, это различие обусловлено большими значениями параметров формирования гранатовых кайм в породах Кандалакшского массива по сравнению с таковыми из друзитовых интрузий Беломорья – 670°C и 6–7 кбар [10]. По соотношению (FeO + MnO)–MgO–CaO одна часть рассмотренных гранатов находится в поле гранулитовой фации, а другая смещена в область более

кальциевых составов (см. рис. 7б), вероятно, за счет влияния валового состава пород.

Плагиоклазы в породах Кандалакшского массива делятся на две группы: андезины и лабрадоры, не обнаруживая видимой связи с составом пород (см. рис. 10). Лабрадоры Кандалакшского массива по составу близки таковым массивов Пыршин и Колвицкий, при этом отдельные плагиоклазы последнего по составу соответствуют битовниту (см. рис. 10).

***P-T* параметры метаморфизма.** Наличие во всех изученных породах Кандалакшского массива реакционных структур допускает возможность неравновесной кристаллизации. Еще одним признаком этого служат зональные кристаллы. Однако такое допущение вполне справедливо для интрузивных пород, не испытавших метаморфических преобразований. В случае с полностью метаморфизованными породами Кандалакшского габбро-анортозитового массива наблюдаемые минеральные ассоциации следует рассматривать в качестве равновесных. В пользу этого свидетельствует и отсутствие зональности состава плагиоклаза и клинопироксена. Отмечаемая изменчивость состава граната в каймах является следствием диффузионного обмена между ним и плагиоклазом. Поэтому полученные результаты *P-T* условий минеральных равновесий следует признать достоверными.

Согласно этим данным в истории метаморфической эволюции Кандалакшского габбро-анортозитового массива можно выделить три дискретных метаморфических события, которые сопровождались частичной или полной перекристаллиза-

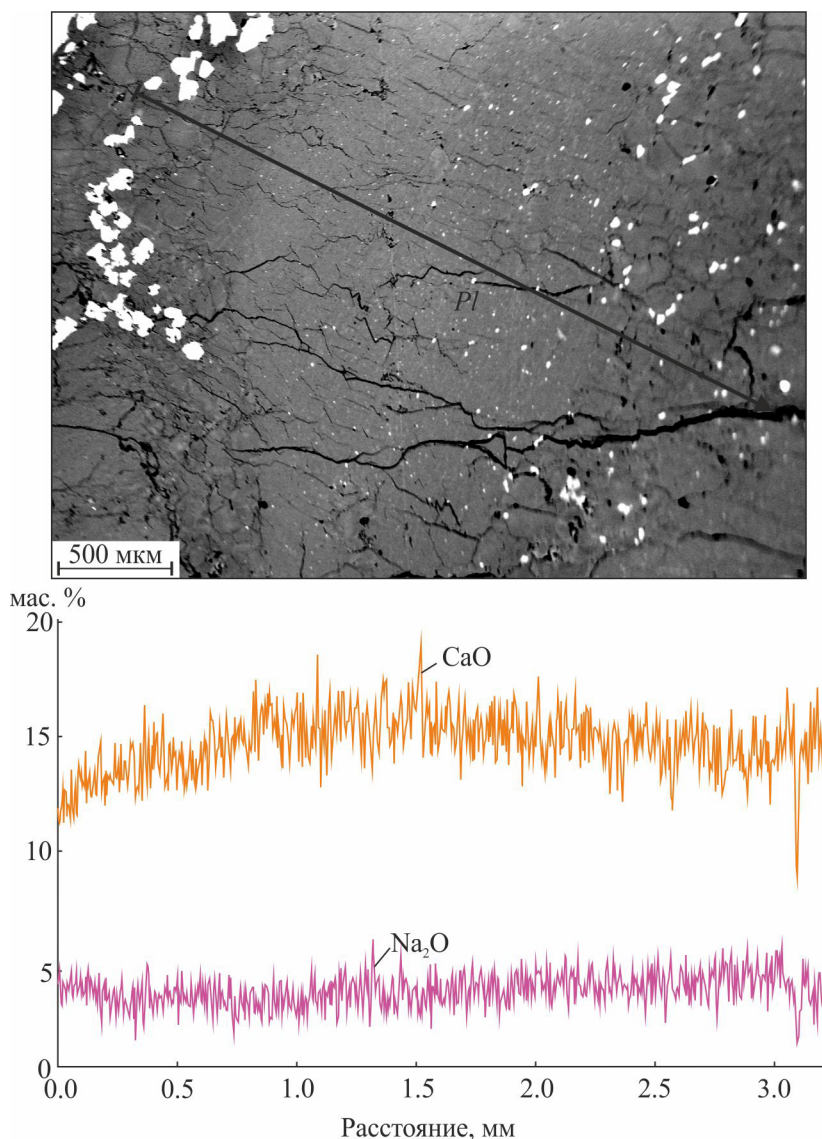


Рис. 11. Изображение зерна плагиоклаза в обратно отраженных электронах из лейкогаббро (шлиф 225/1) и результаты микрозондового профилирования.

Fig. 11. Plagioclase grain image in the back-scattered electrons from leucogabbro (thin section 225/1) and profile microprobe results.

цией пород. Первое из них происходило при температуре 980°C и давлении около 12 кбар (см. рис. 12) и соответствует условиям пикового метаморфизма (M1 – 990°C и около 12 кбар), установленным В.И. Фонаревым [19] для соседнего Колвицкого габбро-анортозитового массива. Второе событие имело наиболее масштабный и, вероятно, продолжительный характер и протекало при температуре 830–910°C и давлении 8–10 кбар (см. рис. 12). Оно сопоставимо с условиями метаморфизма этапа M2 в Колвицком массиве (870–915°C и 10–11 кбар, [19]). Это событие происходило в период коллизии Кандалакшско-Колвицкой зоны гранулитового пояса около 1.9 млрд лет назад, о чем свидетельству-

ют **U-Pb возраст метаморфического циркона Колвицкого габбро-анортозитового массива** [20] и Sm-Nd возрасты как по данным минеральным ассоциациям [18], так и по силлиманит-ортопироксеновым парагенезисам с близкими параметрами метаморфизма расположенного к востоку Порьегубского покрова [11]. Заключительное метаморфическое событие в Кандалакшском габбро-анортозитом массиве, фиксируемое по параметрам минеральных равновесий, отражает регрессивную стадию и происходило при температуре 770–790°C и давлении 7–8 кбар (см. рис. 12), что соответствует условиям метаморфизма этапа M3 в Колвицком массиве (750–830°C и около 8 кбар) [19].

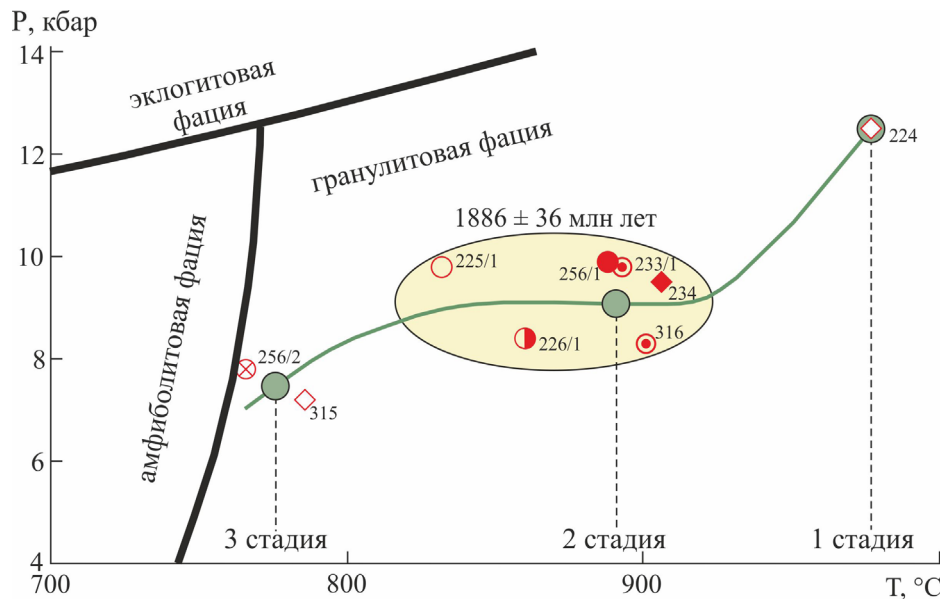


Рис. 12. Тренд изменения P - T условий метаморфизма в породах Кандалакшского габбро-анортозитового массива.

Усл. обозначения см. на рис. 3. Значение Sm-Nd возраста по пороодообразующим минералам из лейкогаббро (проба 225/1) дано по [18]; поля фаций метаморфизма – по [5].

Fig. 12. Transformation trend P - T conditions of metamorphism in the rocks of Kandalaksha gabbro-anorthosite massif.

Legend see fig. 3. Sm-Nd age for rock-forming minerals of leucogabbro (sample 225/1), by [18]; metamorphism facies fields, by [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучены составы минеральных ассоциаций клинопироксен ± ортопироксен–гранат–плаггиоклаз в породах различного состава и степени деформаций Кандалакшского габбро-анортозитового массива. Все клинопироксены по составу соответствуют диопсиду, реже фассаиту, гранаты – смеси пироп–альмандин–гроссуляр, а плаггиоклаз – лабрадору и андезину.

2. Самыми информативными для расшифровки условий образования являются составы клинопироксенов Кандалакшского массива. По большинству признаков они наиболее близки к метаморфогенным клинопироксенам массивов Пыршин и Колвицкий, отличаясь от них пониженной железистостью и большим содержанием Na.

3. Полученные P - T параметры минеральных равновесий в основном соответствуют изобарическим условиям гранулитовой фации метаморфизма (830–910°C и 10 кбар) с отдельными пиковыми параметрами при температуре 980°C и давлении около 12 кбар, а также температуре 770–790°C и давлении 7–8 кбар, которые характеризуют регрессивную стадию эволюции массива. Наиболее масштабные процессы метаморфизма происходили в период около 1.9 млрд лет в результате коллизии Кандалакшско-Колвицкой гранулитовой зоны, что подтверждается изотопно-геохронологическими данными.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-35-20501 мол_а_вед).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авченко О.В., Попов В.С., Мишкин М.А. (1994) Минеральная геобаротермометрия гранат-пироксеновых кристаллосланцев Сутамского метаморфического комплекса. *Геология и геофизика*, (12), 75-85.
2. Балаганский В.В., Тиммерман М.Я., Кислицын Р.В., Дэйли Дж.С., Балашов Ю.А., Ганнибал Л.Ф., Шерстенникова О.Г., Рюнгенен Г.И. (1998) Изотопный возраст пород Колвицкого и Умбинского блоков (юго-восточная ветвь Лапландского гранулитового пояса), Кольский полуостров. *Вестник МГТУ*, 1(3), 19-32.
3. Баянова Т.Б. (2004) Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. СПб.: Наука, 174 с.
4. Бирюков В.М. (1988) Высокобарические комплексы подвижных поясов. М.: Наука, 208 с.
5. Бушмин С.А., Глебовицкий В.А. (2008) Схема минеральных фаций метаморфических пород. *Записки РМО*, (2), 1-13.
6. Вревский А.Б., Львов П.А. (2014) Изотопно-геохимические особенности и возраст анорогенных дифференцированных базитовых интрузий неорхейской инфраструктурной зоны Колмозеро–Воронья–Кейвы (Кольский полуостров). *Геология и полезные ископаемые Карелии*. Вып. 17. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 29-35.
7. Гинзбург И.В. (1970) Обзор систематики пироксе-

- нов. *Минералы базитов в связи с вопросами петрогенезиса*. М.: Наука, 5-39.
8. Глебовицкий В.А., Алексеев Н.Л., Доливо-Добровольский Д.В. (1997) Реакционные структуры и *P-T* режимы охлаждения глубинных образований Кандалакшско-Колвицкой структурно-формационной зоны, Кольский полуостров. *Записки ВМО*, (2), 1-22.
 9. Лаврентьева И.В., Перчук Л.Л. (1991) Экспериментальное изучение фазового соответствия в системе гранат–ортопироксен–амфибол при 700 и 800°C. *Очерки физико-химической петрологии*. Вып. 16. М.: Наука, 139-164.
 10. Ларинова Т.Л. (2000) Формирование друзитовых (коронарных) структур вокруг оливина и ортопироксена при метаморфизме габброидов северного Беломорья, Карелия. *Петрология*, 8(4), 430-448.
 11. Лебедева Ю.М., Глебовицкий В.А., Бушмин С.А., Богомолов Е.С., Савва Е.В., Лохов К.И. (2010) Возраст высокobarического метасоматоза в зонах сдвиговых деформаций при коллизиином метаморфизме в Лапландском гранулитовом поясе: **Sm-Nd** метод датирования парагенезисов из силлиманит-ортопироксеновых пород Порьегубского покрова. *Докл. АН*, 432(1), 99-102.
 12. Митрофанов Ф.П., Балаганский В.В., Балашов Ю.А., Ганнибал Л.Ф., Докучаева В.С., Нерович Л.И., Радченко М.К., Рюнгенен Г.И. (1993) U-Pb возраст габбро-анортозитов Кольского полуострова. *Докл. АН*, 331(1), 95-98.
 13. Митрофанов Ф.П., Нерович Л.И. (2003) Время магматической кристаллизации и метаморфических преобразований автономных анортозитовых массивов Пыршин и Абварский Лапландского гранулитового пояса. *Петрология*, 11(4), 381-390.
 14. Нерович Л.И. (1999) Петрология и геохронология анортозитов Лапландского гранулитового пояса. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Апатиты: КНЦ РАН, 182 с.
 15. Нерович Л.И., Зозуля Д.Р., Каулина Т.В., Деленицын А.А. (2004) Первичные магмы и условия происхождения анортозитов Лапландского гранулитового пояса по данным распределения REE и изотопов Nd. *Материалы международной научно-технической конференции "Наука и образование-2004"*. Мурманск: МГТУ. Ч. 5, 80-84.
 16. Перчук Л.Л., Кротов А.В., Геря Т.В. (1999) Петрология амфиболитов пояса Тана и гранулитов Лапландского комплекса. *Петрология*, 7(4), 356-381.
 17. Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение. (2004) (Ред. Ф.П. Митрофанов и В.Ф. Смолькин). Апатиты: КНЦ РАН. Ч. 2, 177 с.
 18. Стешенко Е.Н., Баянова Т.Б., Серов П.А., Чашин В.В. (2015) Новые изотопные U-Pb и Sm-Nd данные о возрасте формирования и метаморфизма интрузий Кандалакшско-Колвицкого габбро-анортозитового комплекса (Балтийский щит). *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*, (11), 19-24.
 19. Фонарев В.И. (2004) Метаморфическая эволюция Колвицкого анортозитового массива (Лапландско-Колвицкий гранулитовый пояс, Балтийский щит). *Докл. АН*, 395(3), 397-402.
 20. Фриш Т., Джексон Г.Д., Глебовицкий В.А., Ефимов М.М., Богданова М.Н., Пэрриш Р.Р. (1995) U-Pb геохронология цирконов Колвицкого габбро-анортозитового комплекса, южная часть Кольского полуострова. *Петрология*, 3(3), 248-254.
 21. Чашин В.В. (1999) Пироксены Мончетундровского перидотит-пироксенит-лейкогаббрового и Волчьетундровского габбро-анортозитового массивов. *Записки ВМО*, (3), 101-111.
 22. Чашин В.В., Баянова Т.Б., Елизарова И.Р., Серов П.А. (2012) Волчьетундровский массив комплекса автономных анортозитов Главного хребта, Кольский полуостров: геологические, петрогеохимические и изотопно-геохронологические исследования. *Петрология*, 20(5), 514-540.
 23. Чашин В.В., Петров С.В. (2013) Малосульфидные платиновые руды Волчьетундровского массива габбро-анортозитов (Кольский полуостров, Россия). *Геология рудн. месторождений*, 55(5), 415-442.
 24. Шарков Е.В. (1983) Пироксены Колвицкого и Каларского анортозит-мангеритовых массивов. *Геология и геофизика*, (8), 105-113.
 25. Юдин Б.А. (1980) Габбро-лабрадоритовая формация Кольского полуострова и ее металлогения. Л.: Наука, 169 с.
 26. Aoki K.-I., Shiba I. (1973) Pyroxenes from Iherzolite inclusions of Itinome-gata, Japan. *Lithos*, 6, 41-51.
 27. Ashwal L.D. (1982) Mineralogy of mafic and Fe-Ti oxide-rich differentiates of the Marcy anorthosite massif, Adirondacks, New York. *Amer. Miner.*, 67, 14-27.
 28. Bhattacharya A., Krishnakumar K.R., Raith M., Sen S.K. (1991) An improved set of a-X parameters for Fe-Mg-Ca garnets and refinements of orthopyroxene-garnet thermometer and the orthopyroxene-garnet-plagioclase-quartz barometer. *J. Petrol.*, 32, 629-656.
 29. Ellis D.J., Green D.H. (1979) An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 71, 13-22.
 30. Grew E.S., Locock A.J., Mills S.J., Galuskina I.O., Galuskin E.V., Hålenius U. (2013) Nomenclature of the garnet supergroup. *Amer. Miner.*, 98, 785-811.
 31. Harley S.L. (1984) An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 86, 359-373.
 32. Krogh E.J. (1988) The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer – a reinterpretation of existing experimental data. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 99, 44-48.
 33. Krogh Ravna E. (2000) The garnet-clinopyroxene Fe²⁺-Mg geothermometer: an updated calibration. *J. Metamorphic Geol.*, 18, 211-219.
 34. Newton R.C., Perkins D. III. (1982) Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz. *Amer. Miner.*, 67, 203-222.
 35. Powell R. (1985) Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited. *J. Metamorphic Geol.*, 3, 231-243.
 36. Whitney D.L., Bernard W.E. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Amer. Miner.*, 95, 185-187.

Mineral associations in the rocks and metamorphism conditions of the Kandalaksha gabbro-anorthosite massif (Kola Peninsula)

V. V. Chashchin, E. N. Steshenko, Ye. E. Savchenko, Ya. A. Pakhomovsky, A. V. Bazai

Geological Institute KSC RAS

The composition of mineral associations was studied in the main varieties of the rocks within the metamorphosed Kandalaksha gabbro-anorthosite massif in the southern part of the Kola Peninsula. In terms of composition, clinopyroxene corresponds to diopside, less often to fassaite, and orthopyroxene to bronzite and hypersthene. Garnet developed in the form of reaction rims at the pyroxene-plagioclase boundary belongs to pyralspite group *Alm-Prp-Grs* composition. Plagioclase corresponds to andesine and labradore. Relict clinopyroxene grains, according to microprobe profiling, are characterized by homogeneous composition. For garnet from reaction rims developed between clinopyroxene and plagioclase, increasing CaO contents and lower MgO contents were identified when approaching the border of plagioclase. Large relict grains of plagioclase among the granular matrix are characterized by weak deanoortization of the marginal parts. Calculations for garnet-clinopyroxene thermometers and barometers for most of the samples showed temperatures values of mineral equilibria at a level 830–910°C and a pressure of about 10 kbar, which correspond to the isobaric conditions of the granulite facies metamorphism developed nearly 1.9 Ga during the collision process of the Kandalaksha-Kolvitsa granulite zone.

Key words: *Kandalaksha gabbro-anorthosite massif, clinopyroxene, garnet, plagioclase, microprobe profiles, garnet-clinopyroxene thermometers and barometers, P-T conditions.*

REFERENCES

1. Avchenko O.V., Popov V.S., Mishkin M.A. (1994) Mineral geobarothermometry garnet-pyroxene crystalline schists Sutamsk metamorphic complex. *Geol. Geofiz.*, (12), 75-85. (In Russian)
2. Balagansky V.V., Timmerman M.Ya., Kisilitsyn R.V., Dayly J.S., Balashov Yu.A., Gannibal L.F., Sherstenikova O.G., Ryungenen G.I. (1998) The isotopic age of the rocks Kolvitsa and Umba blocks (south-eastern branch of the Lapland granulite belt), Kola Peninsula. *Vestn. MGTU.*, 1(3), 19-32. (In Russian)
3. Bayanova T.B. (2004) *Vozrast repornykh geologicheskikh kompleksov Kol'skogo regiona i dritel'nost' protsessov magmatizma* [Age of reference geological complexes of the Kola region and duration of magmatic processes]. St. Petersburg: Nauka Publ., 174 p. (In Russian)
4. Biryukov V.M. (1988) *Vysokobaricheskie komplekсы podvzhnykh pojassov* [High-pressure systems of moving belts]. Moscow: Nauka Publ., 208 p. (In Russian)
5. Bushmin S.A., Glebovitsky V.A. (2008) Scheme of mineral facies metamorphic rocks. *Zapiski RMO*, (2), 1-13. (In Russian)
6. Vrevsky A.B., L'vov P.A. (2014) Isotope-geochemistry and age anorogenic differentiated mafic intrusions Neoproterozoic infrastructure area Kolmozero-Voronija-Keivy (Kola Peninsula). *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii. Trudy Kar NTS RAN. V. 17* [Geology and useful minerals of Karelija. Proc. 17th: Kar SC RAN]. Petrozavodsk, 29-35. (In Russian)
7. Ginzburg I.V. (1970) Overview of the systematics of pyroxene. *Mineraly bazitov v svyazi s voprosami petrogenezisa* [Mafic minerals in connection with questions of petrogenesis]. Moscow: Nauka Publ., 5-39. (In Russian)
8. Glebovitsky V.A., Alekseev N.L., Dolivo-Dobrovol'sky D.V. (1997) Reaction structures and P-T conditions of the cooling of deep generations Kandalaksha Kolvitsa structural-formational zone, Kola Peninsula. *Zapiski VMO*, (2), 1-22. (In Russian)
9. Lavrent'eva I.V., Perchuk L.L. (1991) Experimental study of phase-matching system orthopyroxene-garnet-amphibole at 700 and 800°C. *Ocherki fiziko-khimicheskoi petrologii. V. 16* [Essays physicochemical petrology. V. 16]. Moscow: Nauka Publ., 139-164. (In Russian)
10. Larikova T.L. (2000) Formation druzi (coronary) structures around the olivine and orthopyroxene during the metamorphism of gabbro northern White Sea, Karelia. *Petrologiya*, 8(4), 430-448. (In Russian)
11. Lebedeva Yu.M., Glebovitsky V.A., Bushmin S.A., Bogomolov E.S., Savva E.V., Lohov K.I. (2010). Age of high-pressure metasomatic zones of shear deformations in the collision metamorphism in Lapland granulite belt: Sm-Nd method of dating parageneses of orthopyroxene-sillimanite rocks in Poregubskii cover. *Dokl. Akad. Nauk*, 432(1), 99-102. (In Russian)
12. Mitrofanov F.P., Balagansky V.V., Balashov Yu.A., Gannibal L.F., Dokuchaeva V.S., Nerovich L.I., Radchenko M.K., Ryungenen G.I. (1993) U-Pb age of the gabbro-anorthosite Kola Peninsula. *Dokl. Akad. Nauk*, 331(1), 95-98. (In Russian)
13. Mitrofanov F.P., Nerovich L.I. (2003) Time and magmatic crystallization and metamorphic transformations of autonomous anorthosite massif Pyrshin and Abvarsky in Lapland granulite belt. *Petrologiya*, 11(4), 381-390. (In Russian)
14. Nerovich L.I. (1999) *Petrologiya i geokhronologiya anortozitov Laplandskogo granulitovogo pojasa. Dis. ... kand. geol.-min. nauk* [Petrology and geochronology of anorthosite Lapland granulite belt. Cand. geol.-min. sci. dis.]. Apatity, 182 p. (In Russian)
15. Nerovich L.I., Zozulya D.R., Kaulina T.V., Delenitsyn A.A. (2004) The primary magma and conditions of

- origin anorthosite Lapland granulite belt according to the distribution of REE and Nd isotopes. *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Nauka i obrazovanie-2004"*. Ch. 5 [Proceedings of the international scientific conference "Science and Education-2004". Pt 5]. Murmansk: MGTU., 80-84. (In Russian)
16. Perchuk L.L., Krotov A.V., Gerya T.V. (1999). Petrology amphibolite Tan belt and Lapland granulite complex. *Petrologiya*, **7**(4), 356-381. (In Russian)
 17. *Rassloennye intruzii Monchegorskogo rudnogo rajona: petrologiya, orudenenie, izotopiya, glubinnoe stroenie*. Ch. 2 (2004) (Eds F.P. Mitrofanov, V.F. Smol'kin) [Layered intrusions Monchegorsk ore region: petrology, mineralization, isotopy, deep structure. Pt 2 (Eds F.P. Mitrofanov, V.F. Smol'kin)]. Apatity: KNTs RAN Publ., 177 p. (In Russian)
 18. Steshenko E.N., Bayanova T.B., Serov P.A., Chashchin V.V. (2015). New isotope U-Pb and Sm-Nd data on the age and formation of metamorphic intrusions Kandalaksha-Kolvitsa gabbro-anorthosite complex (Baltic Shield). *Vestn. IG Komi NTs RAN*, (11), 19-24. (In Russian)
 19. Fonarev V.I. (2004). Metamorphic evolution Kolvitsa anorthosite massif (Lapland-Kolvitsa granulite belt, the Baltic Shield). *Dokl. Akad. Nauk*, **395**(3), 397-402. (In Russian)
 20. Frish T., Jackson G.D., Glebovitsky V.A., Efimov M.M., Bogdanova M.N., Perrish R.R. (1995) U-Pb zircon geochronology Kolvitsa gabbro-anorthosite complex, the southern part of the Kola Peninsula. *Petrologiya*, **3**(3), 248-254. (In Russian)
 21. Chashchin V.V. (1999). Pyroxenes Monchetundra peridotite-pyroxenite-leykogabbro and Volch'etundra gabbro-anorthosite massifs. *Zapiski VMO*, (3), 101-111. (In Russian)
 22. Chashchin V.V., Bayanova T.B., Elizarova I.R., Serov P.A. (2012) Volch'etundra massif of autonomous anorthosite complex Main Range, Kola Peninsula: Geological, petro-geochemical and isotope geochronological studies. *Petrologiya*, **20**(5), 514-540. (In Russian)
 23. Chashchin V.V., Petrov S.V. (2013). Low-sulfide platinum ores Volch'etundra gabbro-anorthosite massif (Kola Peninsula, Russia). *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **55**(5), 415-442. (In Russian)
 24. Sharkov E.V. (1983) Pyroxenes Kolvitsa and Kalarsky anorthosite-mangerite massifs. *Geol. Geofiz.*, (8), 105-113. (In Russian)
 25. Yudin B.A. (1980) *Gabbro-labradoritovaya formatsiya Kol'skogo poluostrova i ee metallogenija* [Gabbro-labradorite formation of the Kola Peninsula and its metallogeny]. Leningrad: Nauka Publ., 169 p. (In Russian)
 26. Aoki K.-I., Shiba I. (1973) Pyroxenes from lherzolite inclusions of Itinome-gata, Japan. *Lithos*, **6**, 41-51.
 27. Ashwal L.D. (1982) Mineralogy of mafic and Fe-Ti oxide-rich differentiates of the Marcy anorthosite massif, Adirondacks, New York. *Amer. Miner.*, **67**, 14-27.
 28. Bhattacharya A., Krishnakumar K.R., Raith M., Sen S.K. (1991) An improved set of a-X parameters for Fe-Mg-Ca garnets and refinements of orthopyroxene-garnet thermometer and the orthopyroxene-garnet-plagioclase-quartz barometer. *J. Petrol.*, **32**, 629-656.
 29. Ellis D.J., Green D.H. (1979) An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **71**, 13-22.
 30. Grew E.S., Locock A.J., Mills S.J., Galuskina I.O., Galuskin E.V., Hålenius U. (2013) Nomenclature of the garnet supergroup. *Amer. Miner.*, **98**, 785-811.
 31. Harley S.L. (1984) An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **86**, 359-373.
 32. Krogh E.J. (1988) The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer – a reinterpretation of existing experimental data. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **99**, 44-48.
 33. Krogh Ravna E. (2000) The garnet-clinopyroxene Fe²⁺-Mg geothermometer: an updated calibration. *J. Metamorphic Geol.*, **18**, 211-219.
 34. Newton R.C., Perkins D.III. (1982) Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene (clinopyroxene)-quartz. *Amer. Miner.*, **67**, 203-222.
 35. Powell R. (1985) Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited. *J. Metamorphic Geol.*, **3**, 231-243.
 36. Whitney D.L., Bernard W.E. (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Amer. Miner.*, **95**, 185-187.