
МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В МИНЕРАЛАХ КЛИНОЦОИЗИТОВЫХ АМФИБОЛИТОВ ПРОЯВЛЕНИЯ КОРУНДСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД ХИТООСТРОВ (СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ)

© 2023 г. Д. члены Е. Ю. Акимова¹, *, С. Г. Скублов^{2, 3}, **

¹*Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7-9, Санкт-Петербург, 199034 Россия*

²*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН,
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия*

³*Санкт-Петербургский горный университет, 21 линия, 2, Санкт-Петербург, 199106 Россия*

*e-mail: e.akimova@spbu.ru

**e-mail: skublov@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.11.2022 г.

После доработки 20.02.2023 г.

Принята к публикации 12.04.2023 г.

Проведено исследование состава минералов (главные и редкоземельные элементы) клиноцоизитовых амфиболитов, тесно ассоциирующих с корундсодержащими породами на проявлении Хитоостров (Северная Карелия). В клиноцоизитовых амфиболитах присутствует железистый флогопит, содержащий больше Al, чем железистый флогопит из вмещающих гранатовых амфиболитов; кальциевый амфибол ряда чермакит–паргасит–сиданагаит; появляются основной плагиоклаз, отсутствующий во вмещающих породах, и маргарит. Отмечаются реакционные взаимоотношения минералов – плагиоклаз-амфиболовые симплектиты вокруг порфиробластов граната, развитие клиноцоизита по кальциевому амфиболу. Некоторые из минералов (клиноцоизит, кальциевый амфибол) приобретают не характерные для них спектры распределения редкоземельных элементов (REE), наследуя их от замещаемых минералов в участках распространения реакционных структур: кальциевый амфибол наследует спектр граната, а клиноцоизит – спектр кальциевого амфибола. Обсуждается гипотеза о метасоматическом происхождении клиноцоизитовых амфиболитов и перераспределение REE под влиянием флюида.

Ключевые слова: Беломорский подвижный пояс, клиноцоизит, амфиболиты, редкоземельные элементы, флюиды, метасоматоз

DOI: 10.31857/S0869605523030024, EDN: XBODUU

В пределах Беломорского подвижного пояса известно более десятка проявлений корундсодержащих пород (Лебедев и др., 1974; Терехов, Левицкий, 1991; Серебряков, 2004; Терехов, 2007, и др.). Генезис этих пород долгое время являлся дискуссионным, оставался открытым вопрос, сформировались ли они в процессе метаморфизма или же являются продуктом метасоматоза. Вторая точка зрения, по нашему мнению, более обоснована. В ее пользу указывают геологические и петрографические наблюдения, результаты физико-химического моделирования процессов минералообразования и изучения флюидных включений в минералах (Акимова, 2022; Акимова, Кольцов, 2022). Важно отметить, что в метасоматическом процессе, приведшем к формирова-

нию корундсодержащих пород, LREE не были инертными компонентами, а переносились под влиянием флюида (Акимова, Скублов, 2021).

С корундсодержащими породами большинства проявлений в Беломорье (Хитоостров, Дядина гора, Варацкое, Кулежда, Высота 128) тесно ассоциируют эпидот-, цоизит-, а также клиноцоизитсодержащие породы, генезис которых также остается невыясненным.

Чаще всего клиноцоизит- и эпидотсодержащие ассоциации в кристаллических сланцах, гнейсах и амфиболитах возникают вследствие метаморфизма (Акбарпуран и др., 2020; Гульбин и др., 2023), но иногда высказываются предположения о метасоматическом генезисе таких ассоциаций (например, Шербакова и др., 2021). В частности, существует гипотеза о метасоматическом происхождении клиноцоизит- и эпидотсодержащих амфиболов, которые пространственно ассоциируют с проявлениями корундсодержащих пород (Серебряков, Корпечков, 2009). Однако детального изучения клиноцоизитовых амфиболов, ассоциирующих с корундсодержащими породами, не производилось, и их генезис до сих пор остается дискуссионным.

Для восполнения данного пробела произведено исследование состава минералов из клиноцоизитовых амфиболов, пространственно ассоциирующих с корундсодержащими породами на проявлении Хитоостров. Особое внимание уделено редкоземельным элементам как индикаторам условий образования пород. Редкие и редкоземельные элементы широко используются при оценке геохимических обстановок, что позволяет с их помощью исследовать условия образования минералов различного генезиса, таких как циркон (Румянцева и др., 2022; Skublov et al., 2022; Levashova et al., 2023), гранат (Стативко и др., 2023), берилл (Гаврильчик и др., 2021; Скублов и др., 2022) и другие.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЗАЛЕГАНИЯ ПОРОД

Хитоостров — проявление метасоматических корундсодержащих пород апогнейсового типа (Серебряков, 2004), расположенное вблизи юго-западной оконечности озера Верхнепулонгское, к северу от пос. Чупа Лоухского района республики Карелия. Проявление располагается в северной части острова Хитоостров и контролируется крупной флексуобразной зоной сдвиговых деформаций, простирающие пород внутри которой меняется от северо-восточного до северо-западного. Породы с корундом образуют в замке этой флексуры линзообразное тело размерами 300×120 м с неровными, извилистыми границами вблизи контакта мигматизированных кианит-гранат-биотитовых гнейсов чупинской толщи и тела коронитовых метагббро (рис. 1), которое превращено в будину (Бабарина и др., 2017). Важно отметить, что габбро интенсивно амфиболизованы в процессе метаморфизма, степень амфиболизации нарастает к краям будины, вплоть до превращения в мигматизированные гранатовые амфиболиты без сохранения магматических минералов.

Среди мигматизированных гранатовых амфиболов в северной части острова залегает небольшое тело клиноцоизитовых амфиболов с неясными контурами (около 1.5 метров в поперечнике). В небольшом обнажении (рис. 1, точка Khi008Д) примерно в 2 метрах севернее тела корундсодержащих пород наблюдается переход от вмещающих гранатовых амфиболов к клиноцоизитовым породам: в гранатовых амфиболитах исчезает кварц, резко уменьшается количество плагиоклаза, появляются разноориентированные кристаллы клиноцоизита. Далее мы будем называть эти породы клиноцоизитовыми амфиболитами.

ПЕТРОГРАФИЯ КЛИНОЦОИЗИТОВЫХ АМФИБОЛИТОВ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

Вмещающие гранатовые амфиболиты (обр. Khi008В, Khi008Г) — полосчатые, интенсивно мигматизированные, средне-крупнозернистые породы светло- до темно-серого

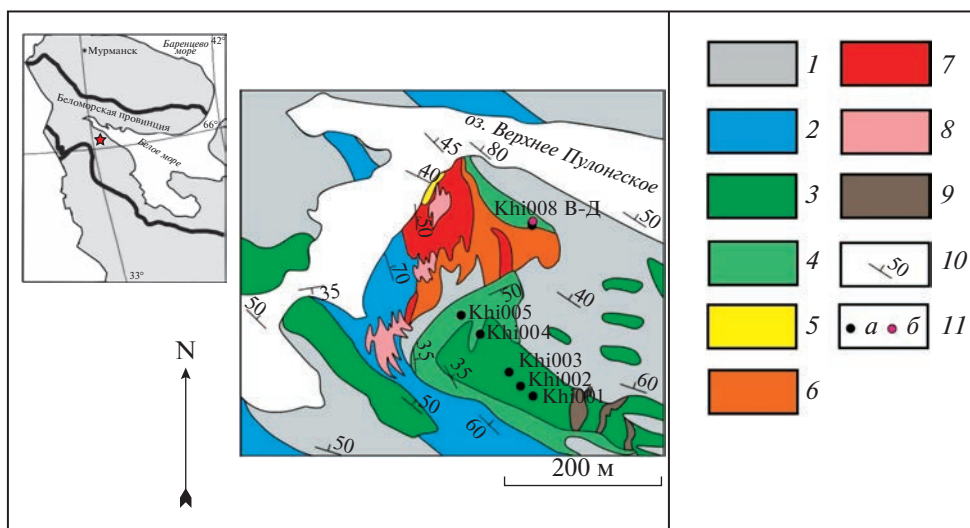


Рис. 1. Схема геологического строения проявления Хитоостров (по: Bindeman et al., 2014, с изменениями) с точками отбора проб.

1 – мигматизированные гранат-биотитовые гнейсы; 2 – мигматизированные кианит-гранат-биотитовые гнейсы; 3 – метаморфизованные габбро; 4 – мигматизированные гранатовые амфиболиты; 5–7 – метасоматические зоны корундосодержащих пород (Акимова, Кольцов, 2022): 5 – породы с парагенезисами Pl + Grt + Bt + Ky, Pl + Grt + Bt + Crn, 6 – породы с парагенезисами Pl + Grt + Bt + St, Pl + Grt + St + Cam, 7 – породы с парагенезисом Pl + Grt + Cam + Crn; 8 – плагиоклазиты; 9 – пегматиты; 10 – элементы залегания, 11 – точки отбора проб (a – вмещающих метагаббро и гранатовых амфиболитов, б – клиноцоизитовых амфиболитов). На врезке красной звездочкой показано положение проявления Хитоостров в пределах Беломорского подвижного пояса Фенноскандинавского щита.

Fig. 1. Scheme of the geological structure of the Khitoostrov deposit (after Bindeman et al., 2014, with changes) with a sampling point.

1 – migmatized garnet-biotite gneisses; 2 – migmatized kyanite-garnet-biotite gneisses; 3 – metamorphosed gabbro; 4 – migmatized garnet amphibolites; 5–7 – metasomatic zones of corundum-bearing rocks: 5 – rocks of zones 1, 3a, 3b, 6 – rocks of zones 2, 3b, 7 – rocks of zone 4 (Akimova, Koltsov, 2022); 8 – plagioclases; 9 – pegmatites; 10 – occurrence elements, 11 – sampling points (a – host metagabbro and garnet amphibolites, b – clinozoisite amphibolites). The red asterisk in the inset shows the location of the Khitoostrov occurrence within the Belomorian mobile belt of the Fennoscandian shield.

цвета. Текстура полосчатая, структура порфиронематобластовая (размер порфиробластов граната достигает 3 см). Иногда в амфиболитах встречается крупный клинопироксен травяно-зеленого цвета (порфиробласты размером до 1 см и более). Кальцевый амфибол и гранат идиоморфны. Минеральный состав варьирует (табл. 1): кальцевый амфибол 40–60%, плагиоклаз 20–40%, гранат 10–20%, кварц около 10%, железистый флогопит – единичные зерна. Акцессорные минералы представлены цирконом, ильменитом, титанитом, рутилом, алланитом, апатитом. Отметим, что породы приобретают существенную неоднородность за счет мигматизации: в лейкоosome существенно возрастает количество кварца, плагиоклаза и граната, в то время как в мезосоме этих минералов существенно меньше, зато возрастает количество кальцевого амфибола.

Главные минералы клиноцоизитовых амфиболитов (обр. Kh008Д) представлены голубовато-зеленым кальцевым амфиболом, плагиоклазом, гранатом и клиноцоизитом (табл. 1). В отличие от вмещающих гранатовых амфиболитов, кальцевый амфибол и гранат здесь ксеноморфны: характерны плагиоклаз-амфиболовые симплектиты вокруг порфиробластов граната (рис. 2, а, б), развитие клиноцоизита по кальцевому

Таблица 1. Распределение минералов в клиноцоизитовых и вмещающих гранатовых амфиболитах
Table 1. Distribution of minerals in clinozoisite and host garnet amphibolites

№	Минерал	Формула	Породы	
			Гранатовые амфиболиты	Клиноцоизитовые амфиболиты
1	Пирит	FeS_2	×	×
2	Кварц	SiO_2	■	
3	Рутил	TiO_2	×	×
4	Ильменит	$\text{Fe}^{2+}\text{TiO}_3$	×	×
5	Циркон	$\text{Zr}(\text{SiO}_4)$	×	×
6	Альмандин	$\text{Fe}_3^{2+}\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	■	■
7	Титанит	$\text{CaTi}(\text{SiO}_4)\text{O}$	×	×
8	Клиноцоизит	$\text{Ca}_2\text{Al}_3(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$		■
9	Эпидот	$\text{Ca}_2(\text{Al}_2\text{Fe}^{3+})(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$		×
10	Ферриэпидот	$\text{Ca}_2(\text{Fe}_2^{3+}\text{Al})(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$		×
11	Алланит-Се	$(\text{CaCe})(\text{Al}_2\text{Fe}^{2+})(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$	×	×
12	Диопсид	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	●	
13	Mg-горнблендит	$\square\text{Ca}_2(\text{Mg}_4\text{Al})(\text{Si}_7\text{Al})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	■	
14	Чермакит	$\square\text{Ca}_2((\text{Mg},\text{Fe})_3\text{Al}_2)(\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{22})(\text{OH})_2$		■
15	Паргасит	$\text{NaCa}_2((\text{Mg},\text{Fe})_4\text{Al})(\text{Si}_6\text{Al}_2)\text{O}_{22}(\text{OH})_2$		■
16	Саданагаит	$\text{NaCa}_2((\text{Mg},\text{Fe})_3\text{Al}_2)(\text{Si}_5\text{Al}_3\text{O}_{22})(\text{OH})_2$		■
17	Флогопит	$\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	■	●
18	Маргарит	$\text{CaAl}_2(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10})(\text{OH})_2$		×
19	Плаггиоклаз	$(\text{Na},\text{Ca})[\text{Al}(\text{Si},\text{Al})\text{Si}_2\text{O}_8]$	■	■
20	Фторапатит	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$	×	×

Примечание. В таблице приведены идеальные формулы минералов. Минералы: ■ — главные (>5 об. %), ● — второстепенные (1–5 об. %), × — акцессорные (<1 об. %).

амфиболу (рис 2, в, г). Соотношения (в процентах): кальциевый амфибол 50–70, гранат 10–30, плаггиоклаз 10–20, клиноцоизит 5–20. Попадаются единичные зерна железистого флогопита. Стоит отметить, что железистый флогопит в основном встречается среди плаггиоклаз-амфиболовых симплектитов вокруг граната. В тех участках, где железистый флогопит непосредственно контактирует с гранатом, развивается тонкая кайма маргарита, по-видимому, замещающего железистый флогопит. Акцессорные минералы представлены титанитом, рутилом, цирконом, алланитом и апатитом. Текстура пород пятнистая, структура порфиронематобластовая (порфиробласты граната размером до 5 см), крупно-среднезернистая, неравномернозернистая. Клиноцоизит иногда встречается в виде крупных вростков в гранате, но в основном тесно ассоциирует с кальциевым амфиболом.

Наблюдается серицитизация плаггиоклаза, хлоритизация кальциевого амфибола, развитие эпидота по железистому флогопиту, плаггиоклазу (вместе с мелкочешуйчатым мусковитом).

КАМЕННЫЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробоотбор осуществлен борзодовым методом при помощи алмазного бензореза. Для исследования выбраны 6 наиболее представительных проб метагаббро, гранатовых и клиноцоизитовых амфиболитов массой не менее 1 кг, которые затем были растерты и отквартованы. Содержание петрогенных (главных) элементов проанализировано рентгеноспектральным флуоресцентным методом (XRF) на многоканальном

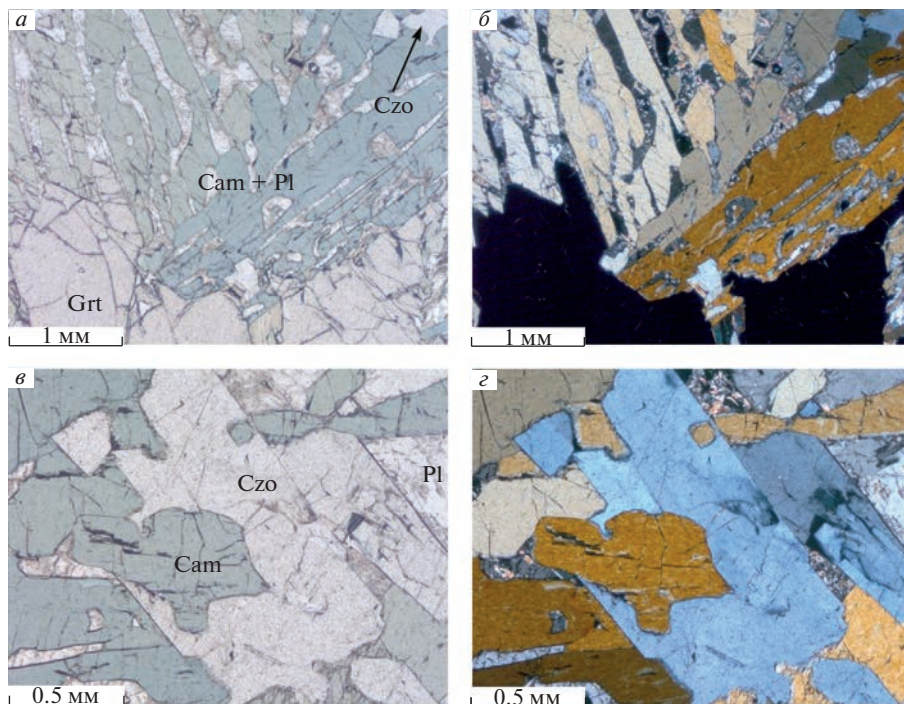


Рис. 2. Фотографии прозрачно-полированного шлифа клиноцойзитового амфиболита (обр. Khi-008Д) в проходящем свете.

а – развитие плагиоклаз-амфиболовых симплектитов вокруг граната, без анализатора; *б* – то же, с анализатором; *в* – замещение кальциевого амфибола клиноцойзитом, без анализатора; *з* – то же, с анализатором.

Fig. 2. Photographs of a transparent polished thin section of clinozoisite amphibolite (sample Khi-008D) in transmitted light.

(*a*) development of plagioclase-amphibole symplectites around garnet, without an analyzer; (*б*) the same, with the analyzer; (*в*) replacement of calcium amphibole with clinozoisite, without an analyzer; (*з*) the same, with the analyzer.

спектрометре ARL-9800 по стандартной методике (ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург). Нижний предел определения оксидов главных элементов составляет 0.01–0.05 мас. %. Результаты анализов приведены в табл. 2.

Состав минералов (158 анализов) определен методом SEM-EDS на растровом электронном микроскопе JSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200 (JEOL) в ИГД РАН, г. Санкт-Петербург (аналитик О.Л. Галанкина). В статье приводятся типичные анализы минералов. Условия измерений: ускоряющее напряжение 20 кВ, сила тока 1 нА, ZAF-метод коррекции матричных эффектов. Использованы стандартные образцы состава: Si, Mg, Fe – оливин, Al – керсутит, Ca – диопсид, Na – жадеит, K – ортоклаз, Mn – спессартин, Ti – TiO_2 , а также чистые соединения и металлы. Локальность анализа составляла 1–2 мкм. Суммы определяемых оксидов и элементов в анализах минералов были приведены к 100 мас. %. Результаты анализов приведены в табл. 3–7. Расчет кристаллохимических формул минералов выполнен с применением известных методик расчета кристаллохимических формул минералов (Кривовичев, Гульбин, 2022). Символы минералов взяты из работы (Whitney, Evans, 2010).

Содержание редкоземельных элементов (REE) определено в тех же участках, что и оксиды главных элементов, на ионном микрозонде Cameca IMS-4f в ЯФ ФТИАН (аналитики С.Г. Симакин, Е.В. Потапов). Условия съемки: используется первичный

Таблица 2. Химический состав (мас. %) пород проявления Хитоостров
Table 2. Chemical composition (wt %) of the rocks of the Khitoostrov occurrence

Порода	Метагаббро	Гранатовые амфиболиты			Гранатовый амфиболит (лейкосомы)	Клиноцоизитовый амфиболит
Образец	Khi001	Khi004	Khi005	Khi008г	Khi008в	Khi008д
SiO ₂	53.20	59.40	53.90	56.70	74.60	44.50
Al ₂ O ₃	16.75	13.89	13.94	15.50	12.40	22.00
TiO ₂	1.34	0.64	0.74	0.62	0.40	0.63
Fe ₂ O ₃ ^{общ}	10.80	8.93	10.40	7.71	2.87	9.08
MnO	0.09	0.24	0.09	0.10	0.06	0.03
MgO	4.11	5.08	7.61	5.91	1.57	6.83
CaO	7.82	8.76	10.10	9.79	4.16	13.10
Na ₂ O	4.88	2.01	1.80	2.43	3.21	1.91
K ₂ O	0.68	0.68	0.88	0.72	0.40	0.98
P ₂ O ₅	0.07	0.07	0.09	0.07	<0.05	0.04
п.п.п.	0.20	0.28	0.38	0.31	0.22	0.85
Сумма	99.94	99.98	99.94	99.86	99.89	99.95

пучок ионов, диаметр которого составляет примерно 15–20 мкм; ток ионов 5–7 нА; ускоряющее напряжение первичного пучка 15 кэВ. Каждое измерение состояло из трех циклов, что позволяло оценить индивидуальную погрешность измерения. Общее время анализа одной точки в среднем составляло 30 мин. Размер исследуемого участка минерала не превышал в диаметре 20 мкм, относительная ошибка измерения для большинства элементов составляла 10–15%, порог обнаружения элементов в среднем равнялся 10 ppb. При построении спектров распределения REE состав минералов был нормирован на состав хондрита CI (McDonough, Sun, 1995). Результаты анализов приведены в табл. 8.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Химический состав пород

Вариации химического состава вмещающих пород – метаморфизованных габбро и гранатовых амфиболитов – детально изучались на проявлении Хитоостров предыдущими исследователями (Терехов, 2007; Stepanova et al., 2022). Отметим лишь, что по мере нарастания степени амфиболитизации габброидов в них постепенно возрастает содержание SiO₂ (от 47.8–53.2 до 59.4 мас. %), CaO (от 7.82–9.96 до 10.10 мас. %). Таким образом, можно наблюдать переход от амфиболитизированных габбро к гранатовым амфиболитам. Гранатовые амфиболиты характеризуются вариациями состава, вызванными в разной степени проявленной мигматизацией: лейкосомы обогащены SiO₂ (74.6 против 56.67 мас. %), Na₂O (3.21 мас. % против 2.08 мас. %) и при этом обеднены MgO, FeO, CaO на фоне мезосом. Состав клиноцоизитовых амфиболитов существенно отличается от состава вмещающих метагаббро и гранатовых амфиболитов (Терехов, 2007; Stepanova et al., 2022) более высоким содержанием Al₂O₃ (22 мас. % против 11.23–15.07 мас. %) и меньшим содержанием SiO₂ (44.5 мас. % против 47.8–56.7 мас. %).

Химический состав минералов

Главные элементы. Гранат из вмещающих гранатовых амфиболитов по составу является альмандином: Fe 1.37–1.76 формульных коэффициентов (ф.к.), Mg 0.34–0.52 ф.к., Ca

Таблица 3. Химический состав (мас. %) граната

Table 3. Chemical composition (wt %) of garnet

Порода	Гранатовый амфиболит					Клиноцоизитовый амфиболит				
Образец	Khi-008B					Khi-008D				
Номер анализа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	37.69	38.28	37.98	37.92	37.48	37.67	37.72	38.00	37.29	36.65
Al ₂ O ₃	21.38	21.58	21.66	21.42	21.43	21.17	21.41	21.48	20.95	20.98
FeO ^{общ}	24.42	21.77	22.03	25.43	26.09	23.36	22.68	22.33	23.54	24.44
MnO	2.18	1.42	1.60	2.09	2.53	1.26	0.93	0.98	2.52	3.39
MgO	3.59	4.41	4.29	4.04	3.59	4.49	4.90	5.08	3.32	2.46
CaO	9.33	11.44	10.92	8.25	7.58	10.91	10.73	10.89	11.03	10.45
Сумма	98.58	98.9	98.48	99.16	98.72	98.84	98.37	98.75	98.64	98.38
Коэффициенты в формулах ($A + B + T = 8$)										
Si	3.00	3.00	3.00	3.00	2.99	2.97	2.97	2.98	2.97	2.95
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03	0.06
ΣT	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.01
Al	2.01	2.00	2.01	2.00	2.01	1.93	1.96	1.96	1.93	1.93
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.07	0.06	0.10	0.12
ΣB	2.01	2.00	2.01	2.00	2.01	2.03	2.03	2.02	2.03	2.06
Fe ²⁺	1.63	1.43	1.45	1.68	1.74	1.44	1.43	1.41	1.46	1.52
Mn	0.15	0.10	0.11	0.14	0.17	0.08	0.06	0.07	0.17	0.23
Mg	0.43	0.52	0.51	0.48	0.43	0.53	0.58	0.59	0.39	0.30
Ca	0.80	0.96	0.92	0.70	0.65	0.92	0.91	0.92	0.94	0.90
ΣA	2.99	3.00	2.99	3.00	2.99	2.97	2.97	2.98	2.97	2.95
Сумма	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.01
O	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00

Примечание. Соотношение Fe²⁺ и Fe³⁺ рассчитано исходя из стехиометрии минерала и правила электро-нейтральности формулы.

0.65–0.98 ф.к. Гранат из клиноцоизитовых амфиболитов имеет схожий химический состав: Fe 1.35–1.66 ф.к., Mg 0.22–0.60 ф.к., Ca 0.88–0.94 ф.к. Присутствует слабая зональность (содержание Mg снижается от центра к краю зерен).

Железистый флогопит (по классификации: Rieder et al., 1988) из вмещающих гранатовых амфиболитов характеризуется невысоким содержанием Al. В клиноцоизитовых амфиболитах также распространен железистый флогопит с X_{Mg} 0.50–0.64 ($X_{Mg} = Mg/(Mg + Fe)$, ф.к.), содержание тетраэдрического алюминия в нем несколько выше ($T_{Al} = 0.25–0.49$) (рис. 3). Иногда присутствуют незначительные примеси Na (до 0.05 ф.к.), Ti (≤ 0.16 ф.к.).

Кальциевые амфиболы во вмещающих гранатовых амфиболитах представлены магнезиогорнблендитом: $B_{Ca}/B_{(Ca + Na)}$ в них равно в среднем 0.94, $C_{(Al + Fe^{3+} + 2Ti)}$ – в среднем 1.34, $A_{(Na + K + 2Ca)}$ – в среднем 0.43. Кальциевые амфиболы из клиноцоизитовых амфиболитов демонстрируют широкие вариации состава и образуют ряды чермакит–паргасит–саданагаит и феррочермакит–ферропаргасит–ферросаданагаит (по классификации: Hawthorne et al., 2012): $B_{Ca}/B_{(Ca + Na)}$ равно в среднем 0.93, $C_{(Al + Fe^{3+} + 2Ti)}$ – в среднем 1.66, $A_{(Na + K + 2Ca)}$ – в среднем 0.51 (рис. 4). То есть, формально это шесть разных минеральных видов, которые далее мы будем объединять под общим названием – кальциевый амфибол, поскольку составы кальциевых амфиболов из клиноцоизитовых амфиболитов образуют единый непрерывный ряд и никаких закономерностей в распределении разных минеральных видов в пределах иссле-

Таблица 4. Химический состав (мас. %) слюд
Table 4. Chemical composition (wt %) of micas

Порода	Гранатовый амфиболит				Клиноцоизитовый амфиболит					
Образец	Khi-008Г				Khi-008D					
Минерал	Phl				Phl				Mrg	
Номер анализа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	37.12	36.70	37.75	36.96	37.17	37.30	36.58	35.66	44.32	42.99
TiO ₂	2.79	2.61	2.65	2.43	0.45	0.70	0.88	2.13	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	16.75	16.48	16.67	16.24	19.13	19.46	19.30	17.97	23.63	23.28
FeO ^{общ}	14.58	13.87	14.17	14.58	18.40	15.96	16.66	18.14	0.71	0.46
MgO	13.92	13.62	14.41	14.07	11.79	13.37	13.11	11.77	0.00	0.00
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.06	29.80
Na ₂ O	0.00	0.25	0.28	0.36	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00
K ₂ O	9.41	8.99	9.43	8.47	9.80	9.34	9.75	8.92	0.00	0.00
Сумма	94.57	92.52	95.36	93.11	96.73	96.14	96.27	94.84	95.72	96.54
Коэффициенты в формулах (O = 11)										
Si	2.82	2.84	2.83	2.84	2.77	2.76	2.73	2.74	3.05	2.97
Ti	0.16	0.15	0.15	0.14	0.03	0.04	0.05	0.12	0.00	0.00
Al	1.02	1.01	1.02	1.02	1.21	1.20	1.23	1.14	0.95	1.03
ΣT	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Al	0.48	0.49	0.46	0.44	0.47	0.49	0.47	0.49	0.96	0.86
Fe ²⁺	0.93	0.9	0.89	0.94	1.15	0.99	1.04	1.16	0.04	0.03
Mg	1.58	1.57	1.61	1.61	1.31	1.47	1.46	1.35	0.00	0.00
Ca	—	—	—	—	—	—	—	—	1.00	1.11
ΣD	2.98	2.95	2.96	2.99	2.93	2.95	2.96	3.00	2.00	2.00
Na	0.00	0.04	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
K	0.91	0.89	0.9	0.83	0.93	0.88	0.93	0.87	0.00	0.00
Ca	—	—	—	—	—	—	—	—	1.00	1.09
ΣA	0.91	0.92	0.94	0.88	0.93	0.88	0.93	0.91	0.00	0.00
Сумма	7.89	7.88	7.9	7.87	7.86	7.84	7.89	7.91	7.00	7.09
X _{Mg}	0.63	0.64	0.64	0.63	0.53	0.60	0.58	0.54	—	—

Примечание. При расчетах вводилась коррекция на изоморфное замещение $M^{2+} + 2OH^- = Ti^{4+} + 2O^{2-}$.

двух образцов не выявлено. Стоит отметить, что состав кальциевого амфибола в плагиоклаз-амфиболовых симплектиках (Cam2) несколько отличается от кальциевого амфибола в матрице породы (Cam1). Cam2 содержит больше Al: в нем выше содержание как ^TAl (2.04 против 0.98 ф.к.), так и ^CAl (1.14 против 0.98 ф.к.), меньше содержание Mg (^CMg 1.66 против 2.18 ф.к.). Таким образом, от магнезиогорнблендита из вмещающих гранатовых амфиболитов кальциевые амфиболы из клиноцоизитовых амфиболитов отличаются более низким содержанием Si, более высокими содержаниями Al и Mg.

Плагиоклаз во вмещающих гранатовых амфиболитах изменяется по составу от кислого до среднего: An_{23–39} (рис. 5). Плагиоклазы из клиноцоизитовых амфиболитов по составу явно разделяются на две группы: An_{45–67} и An_{78–90} (рис. 5), при этом плагиоклазы обеих групп более-менее равномерно рассеяны по породе без отчетливых закономерностей. Попадают и зональные плагиоклазы: например, в центре An₅₁, с краю An₈₆ (т.е. плагиоклаз из центра и из края попадает в две разные группы), или центре An₄₈, с краю An₆₄ (т.е. плагиоклаз из центра и из края попадает в одну группу). Если в матрице попадают плагиоклазы из обеих групп, то в плагиоклаз-амфиболовых симплектиках встречается только основной плагиоклаз.

Таблица 5. Химический состав (мас. %) кальциевых амфиболов

Table 5. Chemical composition (wt %) of calcium amphiboles

Порода	Гранатовый амфиболит				Клиноцоизитовый амфиболит					
Образец	Khi-008Г				Khi-008Д					
Номер анализа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	45.03	45.42	44.16	45.35	43.27	45.03	40.20	40.26	40.69	40.42
TiO ₂	0.74	0.94	0.99	0.71	1.11	0.54	0.00	0.00	0.00	0.38
Al ₂ O ₃	13.11	12.69	14.14	12.03	14.62	16.36	18.39	18.29	18.22	18.42
FeO ^{общ}	13.00	12.31	13.07	13.44	12.58	10.32	17.00	17.29	17.07	17.21
MgO	11.72	12.18	11.43	12.30	11.96	12.10	7.79	7.56	7.39	7.33
CaO	12.04	12.27	11.81	11.97	12.02	11.08	11.68	11.81	11.86	11.81
Na ₂ O	1.51	1.39	1.49	1.36	1.63	1.73	1.79	1.52	1.71	1.53
K ₂ O	0.96	0.94	1.10	0.94	1.00	0.88	1.12	1.26	1.06	0.97
Сумма	98.11	98.15	98.17	98.10	98.19	98.02	97.98	97.99	97.99	98.07
Коэффициенты в формулах ($C + T = 13$)										
Si	6.55	6.59	6.41	6.58	6.27	6.41	5.96	5.98	6.05	5.99
Al	1.45	1.41	1.59	1.42	1.73	1.60	2.04	2.02	1.95	2.01
ΣT	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Ti	0.08	0.10	0.11	0.08	0.12	0.06	0.00	0.00	0.00	0.04
Al	0.80	0.77	0.83	0.63	0.77	1.15	1.17	1.18	1.24	1.21
Fe ³⁺	0.30	0.26	0.47	0.52	0.59	0.44	0.43	0.41	0.24	0.44
Fe ²⁺	1.28	1.23	1.12	1.11	0.93	0.79	1.67	1.74	1.88	1.70
Mg	2.54	2.64	2.47	2.66	2.58	2.57	1.72	1.67	1.64	1.62
ΣC	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Ca	1.88	1.91	1.84	1.86	1.87	1.69	1.86	1.88	1.89	1.87
Na	0.12	0.09	0.16	0.14	0.13	0.31	0.15	0.12	0.11	0.13
ΣB	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Na	0.30	0.30	0.26	0.24	0.32	0.16	0.37	0.32	0.38	0.31
K	0.18	0.17	0.20	0.17	0.19	0.16	0.21	0.24	0.20	0.18
ΣA	0.48	0.47	0.46	0.42	0.51	0.32	0.58	0.56	0.58	0.50
O (кроме W)		22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00
OH ⁻	1.84	1.79	1.78	1.85	1.76	1.88	2.00	2.00	2.00	1.92
O	0.16	0.21	0.22	0.15	0.24	0.12	0.00	0.00	0.00	0.09
ΣW	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
$A + B + C + T$	15.48	15.47	15.46	15.42	15.51	15.32	15.58	15.56	15.58	15.50
Видеоопределяющие характеристики	$B/(Ca + \Sigma M^{2+})/\Sigma B \geq 0.75, {}^B Ca/\Sigma B \geq {}^B \Sigma M^{2+}/\Sigma B$									

Примечание. Соотношение OH, Fe²⁺ и Fe³⁺ рассчитано, исходя из стехиометрии минерала и правила электронейтральности формулы.

Минералы группы эпидота в клиноцоизитовых амфиболитах представлены клиноцоизитом, т.к. содержание Fe³⁺ в позиции M3 менее 0.5 (по классификации Armbruster et al., 2006), единичные анализы соответствуют составу эпидота (рис. 6). По биотиту развивается поздний ферриэпидот.

Титанит из вмещающих гранатовых амфиболитов содержит примесь Mg (до 0.09 ф.к.) и Fe²⁺ (до 0.06 ф.к.). В титаните из клиноцоизитовых амфиболитов выявлена только примесь Fe²⁺ (до 0.01 ф.к.).

Маргарит содержит примесь Fe²⁺ (до 0.04 ф.к.).

Редкоземельные элементы. *Гранат.* Характер распределения REE в гранате был проанализирован в одном крупном порфиروبласте, в пяти точках. Анализ выполнялся

Таблица 6. Химический состав (мас. %) минералов группы эпидота
Table 6. Chemical composition (wt %) of epidote-group minerals

Порода	Клиноцоизитовый амфиболит									
Образец	Khi-008Д									
Минерал	Czo								Fep	Ep
Номер анализа	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	39.52	39.08	39.26	39.04	38.97	38.76	38.35	38.71	37.71	38.78
Al ₂ O ₃	32.88	28.90	30.36	28.06	28.03	28.59	28.00	28.44	20.43	27.05
FeO ^{общ}	2.01	6.62	4.05	7.19	6.65	7.12	6.66	6.87	15.59	8.36
CaO	25.11	24.25	24.70	24.55	23.92	24.39	23.70	24.58	23.00	24.61
Сумма	99.52	98.85	98.37	98.84	97.57	98.85	96.71	98.61	96.74	98.78
Коэффициенты в формулах ($A + M1 + M2 + M3 + T = 8$)										
Si	2.96	2.99	2.99	2.99	3.02	2.97	3.00	2.97	3.03	2.98
ΣT	2.96	2.99	2.99	2.99	3.02	2.97	3.00	2.97	3.03	2.98
Al	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.94	2.00
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00
$\Sigma M1, M2$	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Al	0.90	0.60	0.73	0.53	0.56	0.58	0.58	0.57	0.00	0.45
Fe ³⁺	0.13	0.42	0.26	0.46	0.43	0.46	0.43	0.44	0.98	0.54
$\Sigma M3$	1.03	1.03	0.99	0.99	0.99	1.04	1.00	1.01	0.98	0.99
Ca	2.01	1.99	2.02	2.02	1.99	2.00	1.99	2.02	1.98	2.03
ΣA	2.01	1.99	2.02	2.02	1.99	2.00	1.99	2.02	1.98	2.03
Сумма	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	7.99	8.00	8.00	8.00
O	11.97	12.00	11.99	11.99	12.02	11.98	12.00	11.97	11.93	11.98

Примечание. Соотношение Fe²⁺ и Fe³⁺ рассчитано, исходя из стехиометрии минерала и правила электронейтральности формулы. Fep – ферриэпидот.

для центра зерна (ц), промежуточных частей (п) и края (к). Спектры распределения REE в гранате из клиноцоизитовых амфиболитов характеризуются четко выраженным положительным наклоном от легких к тяжелым REE (рис. 7, а). Отмечается слабо выраженная отрицательная Eu аномалия. Зональность по редкоземельным элементам практически не проявлена. Центральные части зерна граната несколько обогащены HREE и обеднены LREE, по сравнению с краевыми частями. Такие спектры распределения редкоземельных элементов весьма характерны для гранатов из метаморфических пород Беломорского подвижного пояса (Скублов, 2005), в том числе и для гранатов из гранатовых амфиболитов проявления Хитоостров (Акимова, Скублов, 2021).

Железистый флогопит. Спектры распределения REE в железистом флогопите из клиноцоизитовых амфиболитов были изучены в двух точках в пределах 2-х зерен на участке распространения плагиоклаз-амфиболовых симплектитов вокруг граната. Железистый флогопит характеризуется необычным “синусоидальным” спектром распределения REE с четко выраженными положительными аномалиями La и Sm (рис. 7, б). При этом отрицательная Eu аномалия в них не фиксируется.

Кальцевый амфибол. Спектры распределения REE в кальцевых амфиболах из клиноцоизитовых амфиболитов изучены в трех точках в трех зернах, как за пределами участка распространения плагиоклаз-амфиболовых симплектитов (Cam1), так и внутри него (Cam2). Фиксируется выраженное различие спектров распределения REE в Cam1 и в Cam2 (рис. 7, в). Кальцевый амфибол в матрице породы (Cam1) характеризуется пологим спектром с очень слабо выраженной отрицательной Eu аномалией, который в целом схож со спектром распределения REE в кальцевом амфиболе из вмещающих гранатовых амфиболитов (Акимова, Скублов, 2021). Схожие пологие спек-

Таблица 7. Химический состав (мас. %) титанита

Table 7. Chemical composition (wt %) of titanite

Порода	Гранатовый амфиболит			Клиноцоизитовый амфиболит				
Образец	Khi-008Г			Khi-008Д				
Номер анализа	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	28.67	29.89	29.60	28.48	28.68	27.58	27.65	27.66
TiO ₂	35.55	30.99	30.24	36.21	36.16	36.13	36.27	36.69
Al ₂ O ₃	1.62	3.90	5.03	1.78	1.53	1.40	1.60	1.57
FeO ^{общ}	0.00	1.65	1.94	0.30	0.39	0.39	0.37	0.46
MgO	0.00	0.91	1.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	26.26	24.81	23.96	26.76	26.99	26.60	26.77	26.61
Сумма	92.10	92.15	92.52	93.52	93.76	92.10	92.66	92.98
Коэффициенты в формулах (рассчитаны на 3 катиона)								
Si	1.01	1.03	1.01	0.99	0.99	0.97	0.97	0.97
Ti	0.94	0.80	0.77	0.94	0.94	0.96	0.95	0.96
Al	0.07	0.16	0.20	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07
Fe ²⁺	0.00	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.00	0.02	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.00	0.05	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.99	0.92	0.87	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
Сумма	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
O ²⁻	4.98	4.92	4.90	4.96	4.97	4.96	4.96	4.97

Примечание. Соотношение Fe²⁺ и Fe³⁺ рассчитано, исходя из стехиометрии минерала и правила электро-нейтральности формулы.

тры распределения редкоземельных элементов характерны для кальциевых амфиболов из пород высокотемпературной амфиболитовой фации метаморфизма (Skublov, Drugova, 2003). В то же время, спектр кальциевого амфибола из плагиоклаз-амфиболовых симплектитов более необычный — он приобретает существенный положительный наклон, появляется довольно выраженная отрицательная Ce аномалия.

Плагиоклаз. Содержание редкоземельных элементов в плагиоклазах было проанализировано в двух точках в двух зернах за пределами плагиоклаз-амфиболовых симплектитов. В пределах симплектитов установить состав плагиоклаза не удалось, поскольку в них он сильно серицитизирован. Плагиоклазы из клиноцоизитовых амфиболитов характеризуются пологим спектром распределения REE (рис. 7, з) и четко выраженной положительной Eu аномалией, что характерно для плагиоклазов.

Клиноцоизит. Спектры распределения REE в клиноцоизите из клиноцоизитовых амфиболитов изучены в трех точках в пределах трех зерен (рис. 7, д). Отмечается существенная вариативность спектра распределения REE в клиноцоизите: меняется суммарное содержание REE, наклон спектра — от практически пологого до существенно положительного наклона, степень проявления положительной Eu аномалии (от слабо выраженной для клиноцоизита с пологим спектром до существенной в клиноцоизите с наклонным спектром). Как правило, минералы группы эпидота в разных породах выступают в роли концентратора LREE, поэтому спектр распределения REE в них обычно приобретает в разной степени выраженный отрицательный наклон, вследствие чего, в частности, для них характерна высокая вариативность спектра распределения REE (Frei et al., 2004). Из сравнения с известными спектрами минералов группы эпидота вытекает вывод, что клиноцоизит в клиноцоизитовых амфиболитах приобретает нехарактерный для него спектр распределения REE.

Титанит. Содержание редкоземельных элементов в титаните было проанализировано в двух точках в двух зернах в пределах плагиоклаз-амфиболовых симплектитов

Таблица 8. Содержание редкоземельных элементов (ppm) в минералах из клиноцоизитовых амфиболитов (обр. Khi-008Д)**Table 8.** Content of rare earth elements (ppm) in minerals of clinozoisite amphibolites (sample Khi-008D)

Минерал	Alm					Cam1	Cam2	
Номер анализа	22	23	24	25	27	18	31	35
	ц	п	п	к	к			
La	0.01	—	—	—	—	0.31	0.04	0.03
Ce	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.87	0.06	0.04
Pr	—	—	—	—	H.o.	0.21	0.01	0.02
Nd	0.06	0.03	0.04	0.07	0.03	1.85	0.21	0.18
Sm	0.08	0.15	0.11	0.12	0.12	0.82	0.36	0.17
Eu	0.06	0.04	0.06	0.08	0.05	0.29	0.14	0.15
Gd	0.81	1.01	1.09	1.09	1.44	1.64	1.2	1.47
Tb	0.41	0.46	0.48	0.52	0.55	0.28	0.5	0.61
Dy	4.86	5.25	6.1	6.3	6.56	2.18	6.31	8.87
Ho	1.56	1.61	1.71	1.98	2.16	0.44	2.23	2.66
Er	6.5	6.81	7.59	8.73	9.46	1.54	9.16	10.9
Yb	8.76	8.66	9.64	11.3	13.4	1.58	12.2	13.6
Lu	1.12	1.25	1.24	1.45	1.73	0.22	1.51	1.77

Минерал	Pl		Phl		Czo			Ttn	
Номер анализа	20	19	28	34	29	30	36	32	33
La	0.03	0.02	2.28	2.23	0.01	1.67	0.02	11.1	7.41
Ce	0.03	0.03	0.05	0.07	0.02	7.55	0.07	65.6	33.7
Pr	0.01	—	0.01	0.01	—	1.89	0.02	15.1	8.6
Nd	0.04	—	0.06	0.05	0.05	12	0.25	108	58.8
Sm	0.02	—	0.1	0.19	0.27	6.56	0.48	48.1	23.7
Eu	0.09	0.05	H.o.	H.o.	0.18	3.9	1.93	7.68	5.87
Gd	0.02	0.03	—	0.03	0.09	13.3	2.79	55.6	25.9
Tb	0.01	—	0.03	0.01	0.06	2.81	1.74	—	—
Dy	0.03	0.03	0.91	0.9	1.14	31.7	26.6	58.7	37.2
Ho	0.01	0.02	0.82	0.8	0.63	8.73	9.55	—	—
Er	0.02	0.04	0.39	0.24	5.14	36.2	45.2	17	11
Yb	0.02	—	0.06	0.04	14.3	45.8	58.2	10.3	6.72
Lu	—	—	0.03	0.03	1.89	5.27	6.63	2.6	1.85

Примечание. ц — ядро, п — промежуточная зона, к — край зерна граната. Cam1 — кальциевый амфибол из матрицы клиноцоизитовых амфиболитов, Cam2 — кальциевый амфибол из плагиоклаз-амфиболовых симплектитов. Прочерк — содержание элемента ниже порога обнаружения. H.o. — содержание элемента не определено.

(рис. 7, е). Титанит характеризуется выпуклым в области LREE спектром распределения REE с небольшой отрицательной Eu аномалией и несколько повышенным содержанием Lu. Такая форма спектра распределения REE свидетельствует о том, что титанит в клиноцоизитовых амфиболитах не мог сформироваться путем замещения граната — в противном случае титанит характеризовался бы иным, выпуклым в области HREE спектром распределения REE (Скублов и др., 2014).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Клиноцоизитовые амфиболиты залегают в виде небольшой линзы с нечеткими контурами среди гранатовых амфиболитов и связаны с последними постепенным переходом: сначала в гранатовых амфиболитах исчезает кварц, затем резко уменьшается



Рис. 3. Диаграмма составов темных слюд из клиноцойзитовых и вмещающих гранатовых амфиболитов (по: Rieder et al., 1988).

Fig. 3. Compositional diagram of dark mica from clinozoisite and host garnet amphibolites.

количество плагиоклаза, появляется клиноцойзит. Судя по геологическим и минерало-петрографическим наблюдениям, клиноцойзитовые амфиболиты проявления Хитоостров являются метасоматитами, развивающимися по гранатовым амфиболитам, образовавшимся вследствие метаморфизма габбро. Об этом свидетельствует следующий комплекс признаков.

Во-первых, клиноцойзитовые амфиболиты характеризуются специфическим минеральным составом и составом минералов: в них появляются кальциевый амфибол ряда чермакит–паргасит–санагаит, минералы группы эпидота (клиноцойзит, реже эпидот) и маргарит, отсутствующие во вмещающих породах; железистый флогопит в клиноцойзитовых амфиболитах содержит больше Al, чем железистый флогопит во вмещающих гранатовых амфиболитах, а плагиоклаз в них более основной по сравнению с вмещающими породами. Отметим, что перечисленные особенности минерального состава отличают рассматриваемые породы от метаморфических эпидотовых амфиболитов, где минералы группы эпидота встречаются в ассоциации кварцем, кислым плагиоклазом и умеренно-глиноземистым кальциевым амфиболом (Bucher, Grapes, 2011; Щербакова и др., 2021; Гульбин и др., 2023). Ассоциация клиноцойзита с основным плагиоклазом в клиноцойзитовых амфиболитах Хитоострова могла возникнуть при десиляции гранатовых амфиболитов в сочетании с кальциевым метасоматозом и/или выносом Na. Во-вторых, от вмещающих гранатовых амфиболитов клиноцойзитовые амфиболиты отличаются повышенным содержанием Al, понижен-

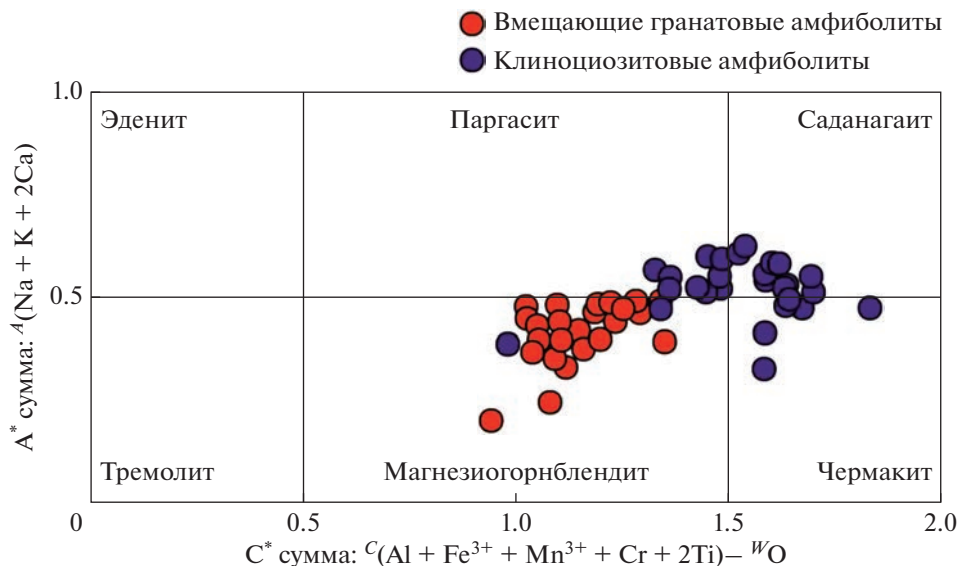


Рис. 4. Диаграмма составов кальциевого амфибола из клиноцизитовых (обр. Khi008Д) и вмещающих гранатовых (обр. Khi008Г) амфиболитов. Поля составов согласно работе (Hawthorne et al., 2012).

Fig. 4. Diagram of the compositions of calcium amphibole from clinozoisite (sample Khi008D) and host garnet (sample Khi008G) amphibolites. Composition fields after (Hawthorne et al., 2012).

ным содержанием Si, их состав не соответствует магматическому протолиту. В-третьих, в клиноцизитовых амфиболитах широко распространены реакционные структуры – замещение крупных порфировластов граната плагиоклаз-амфиболовыми симплектитам, замещение кальциевого амфибола клиноцизитом.

Таким образом, высказанная предыдущими исследователями (Серебряков, 2004; Серебряков, Корпечков, 2009) гипотеза о метасоматическом происхождении клиноцизитовых амфиболитов находит дополнительное подтверждение в полученных нами данных по составу минералов и пород. Тот факт, что клиноцизитовые амфиболиты, как и корундсодержащие метасоматиты, характеризуются аномальным изотоп-

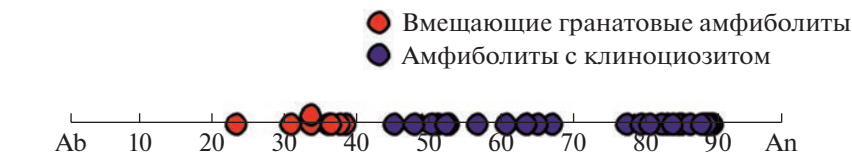


Рис. 5. Диаграмма составов плагиоклаза из клиноцизитовых и вмещающих гранатовых амфиболитов.

Fig. 5. Compositional diagram of plagioclase from clinozoisite and host garnet amphibolites.

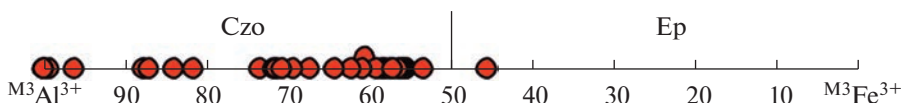


Рис. 6. Диаграмма составов минералов группы эпидота из клиноцизитовых амфиболитов.

Fig. 6. Compositional diagram of epidote-group minerals from clinozoisite amphibolites.

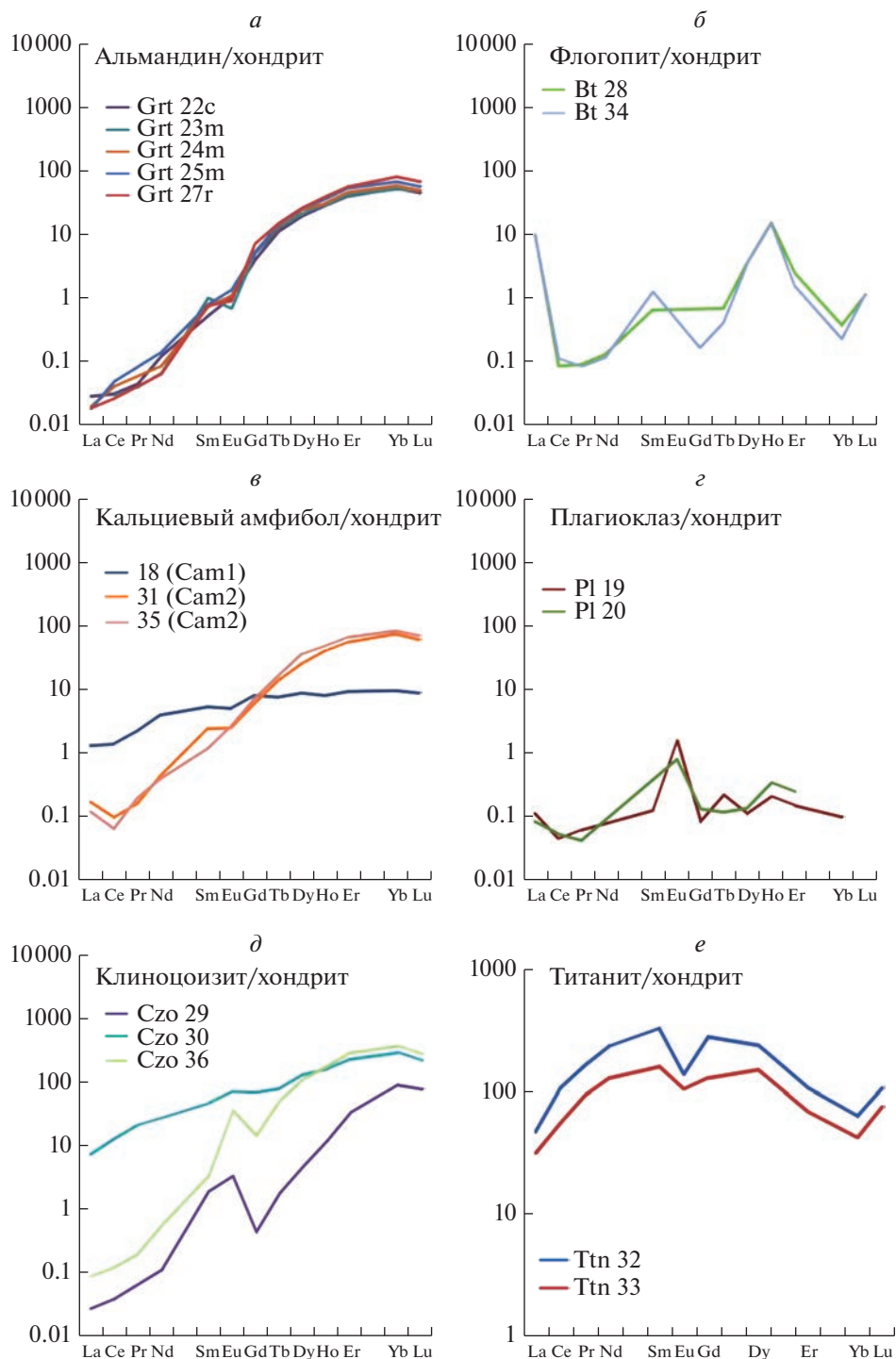


Рис. 7. Спектры распределения REE в минералах из клиноцоизитовых амфиболитов.

Fig. 7. REE distribution spectra in minerals from clinozoisite amphibolites.

ным составом кислорода и водорода в минералах [$\delta^{18}\text{O}$ в них достигает -16‰ на проявлении Хитоостров (Bindeman et al., 2014, и ссылки в этой работе)], указывая на их генетическое родство с корундсодержащими породами, которые тоже характеризуются аномально изотопно-легким кислородом и водородом.

Важной особенностью клиноцоизитовых амфиболитов является то, что некоторые из минералов (клиноцоизит, кальциевый амфибол) приобретают не характерные для них спектры распределения REE, наследуя их от замещаемых минералов. Так, спектр кальциевого амфибола из плагиоклаз-амфиболовых симплектитов вокруг граната весьма похож на спектр граната, по которому он развивается (рис. 8). При сопоставлении спектров граната и кальциевого амфибола из симплектитов видно, что спектр кальциевого амфибола отличается от спектра граната лишь несколько повышенным содержанием LREE, в особенности, лантана; а в области тяжелых REE его спектр полностью наследует спектр граната.

Подобная картина наблюдается и для клиноцоизита. При сравнении спектра клиноцоизита и спектра кальциевого амфибола из матрицы амфиболитов видно, что, хотя содержание всех REE в клиноцоизите выше, он отчасти копирует пологий спектр кальциевого амфибола (рис. 9).

Клиноцоизит развивается и по кальциевому амфиболу в области распространения плагиоклаз-амфиболовых симплектитов вокруг граната, частично наследуя при этом его спектр, который кальциевый амфибол, в свою очередь, ранее унаследовал от граната (рис. 10). При этом спектр наследуется уже с некоторыми отличиями: меняется содержание REE (причем оно может как уменьшаться, так и увеличиваться), приобретает положительная Eu аномалия, иногда повышается и содержание Sm, но в целом спектр распределения REE в клиноцоизите остается похожим на спектр распределения REE в гранате (рис. 10).

Наследование спектров распределения REE одних минералов другими, вероятно, проявляется за счет низких скоростей диффузии REE в кристаллической решетке.

По-видимому, наследованию спектров граната кальциевым амфиболом и клиноцоизитом способствует, во-первых, то, что входжение во все эти минералы REE не отражается на их структуре и является, с точки зрения термодинамики, идеальным смешением, во-вторых, то, что все три минерала могут содержать достаточно много REE, в-третьих, то, что во всех этих минералах REE входят в позицию Ca (Скублов, 2005 и ссылки в этой работе).

Известны немногочисленные упоминания о наследовании спектров REE одних минералов другими. Так, при частичном плавлении диоритов и габброидов гранат наследует профили распределения REE от амфиболов и клиноцоизитов из вмещающих пород (Clarke et al., 2003). В качестве других примеров можно привести перераспределение тяжелых редкоземельных элементов (HREE) из частично замещаемого рутила и титанита в каймы новообразованного граната в эклогитах (Beinlich et al., 2010), наследование гранатом спектра REE кордиерита в метапелитах (Сафонов и др., 2017), наследование амфиболом и эпидотом спектра REE граната, клинопироксена в процессе метаморфизма (Cortesogno et al., 2000; Sassi et al., 2000; Skublov, Drugova, 2003; Centrella et al., 2016), наследование пироксенами спектра REE граната в мантийных перидотитах (Koga et al., 1998).

Как известно, REE являются наиболее надежной, зачастую единственной меткой участия флюидов в процессе минералообразования (Файф и др., 1981). При высокотемпературном метаморфизме REE обычно инертны вследствие низкой скорости диффузии трехвалентных REE в структуре минералов, когда они замещают двухвалентные катионы, главным образом, Ca (Скублов, 2005); но участие значительного количества флюида в процессе минералообразования приводит к тому, что REE становятся подвижными, и происходит их локальное перераспределение. Так, при метаморфизме пелитов Енисейского края соблюдается изохимический характер процес-

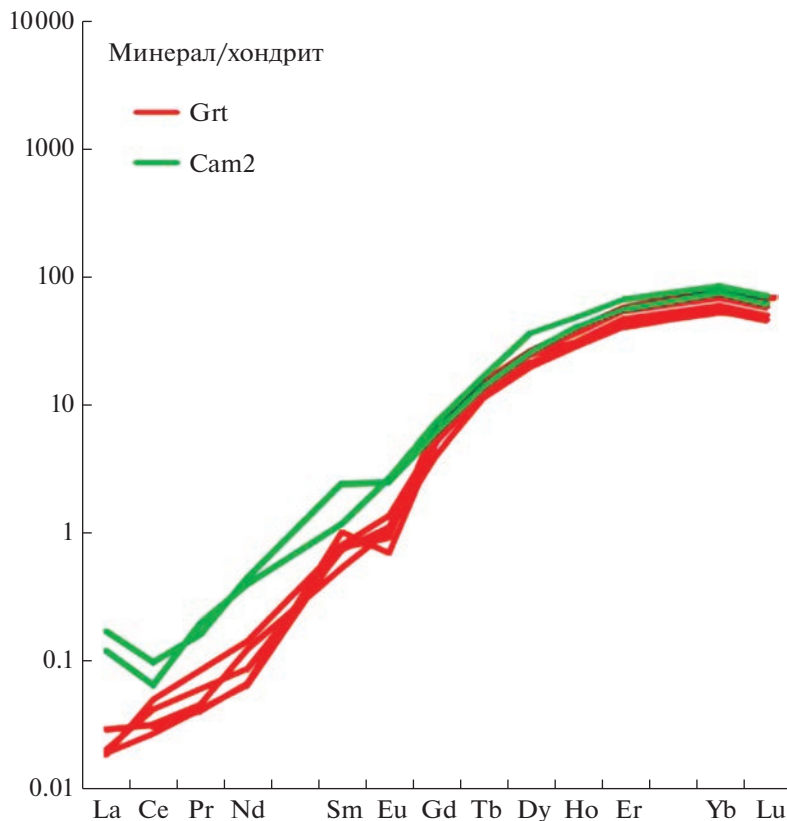


Рис. 8. Унаследование кальциевым амфиболом из плагиоклаз-амфиболовых симплектитов (Cam2) распределения REE граната (Grt).

Fig. 8. Inheritance of garnet REE distribution (Grt) by calcium amphibole from plagioclase-amphibole symplectites (Cam2).

са в отношении большинства компонентов системы, но для HREE принцип изохимичности не выполняется, т.е. они при метаморфизме приобретали подвижность (Likhanov, 2018).

Кроме того, REE часто приобретают подвижность при инфильтрационном метасоматозе, когда отношение флюид/порода достигает 10^2 – 10^3 (Bau, 1991), что подтверждается данными экспериментов (Louvel et al., 2015). Известно много разных вариантов поведения редкоземельных элементов при метасоматозе: REE могут оставаться инертными или приобретать подвижность, при этом подвижными могут становиться легкие, средние и/или тяжелые REE; может происходить привнос, вынос, либо местное перераспределение REE (Ague, 2017, и ссылки в этой работе). На поведение тех или иных редкоземельных элементов во флюиде влияют состав и свойства флюида. Транспорт REE может осуществляться за счет образования хлоридных, фторидных и гидроксидных комплексов в кислых, нейтральных и щелочных условиях соответственно (Haas et al., 1995). При этом в гидротермальных растворах главными лигандами, транспортирующими REE, являются хлор-ион и сульфат-ион, а фторидные комплексы скорее способствуют осаждению перемещенных флюидом REE (Migdisov et al., 2016). Из-за различий в стабильности хлоридных комплексов легких и тяжелых редкоземельных элементов (LREE и HREE) может происходить фракционирование REE. Например, пере-

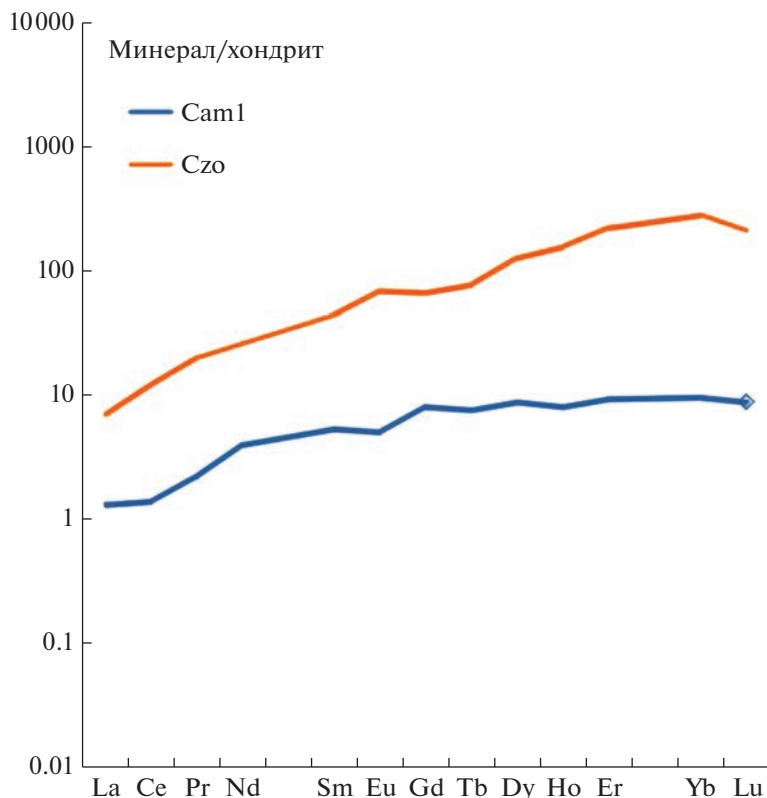


Рис. 9. Унаследование клиноцоизитом (Czo) спектра распределения REE кальциевого амфибола из матрицы породы (Cam1).

Fig. 9. Inheritance by clinozoisite (Czo) of the REE distribution spectrum of calcium amphibole from the rock matrix (Cam1).

работка флюидом пород комплекса Дабие-Сулу (UHP эклогитов и гранитогнейсов), известных своим аномально изотопно-легким кислородом ($\delta^{18}\text{O}$ до -12‰), привела к привносу не только LREE, но и HREE (Huang, Xiao, 2015, и ссылки в этой работе).

В пределах Беломорского подвижного пояса тоже описаны примеры подвижного поведения REE. Так, известно обогащение LREE минералов апоамфиболитовых эклогитов, эклогитоподобных пород и плагиомигматитов, где оно связывается с воздействием на породы щелочного флюида во время свекофеннского этапа регионального метаморфизма (Козловский, Бычкова, 2016). В случае корундсодержащих пород проявления Хитоостров воздействие субщелочного углекислотно-водного флюида, содержащего хлориды Na и Ca, на кианит-гранат-биотитовые гнейсы привело к мобилизации (привносу) LREE (Акимова, Скублов, 2021; Акимова, 2022). Как следует из полученных данных по распределению REE в минералах клиноцоизитовых амфиболитов, REE в процессе их формирования тоже не оставались инертными – происходило локальное перераспределение LREE. Вероятно, в случае клиноцоизитовых амфиболитов мобилизации и перераспределению LREE тоже способствовало формирование хлоридных комплексов во флюиде.

Несомненно, это интересное явление требует дальнейших экспериментальных исследований.

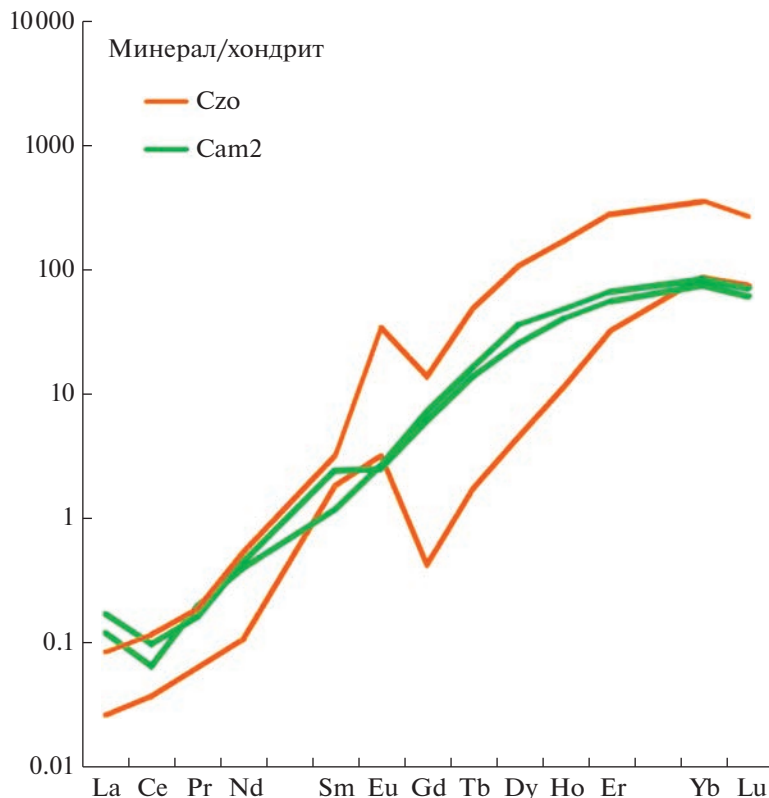


Рис. 10. Унаследование клиноцоизитом (Czo) спектра распределения REE кальциевого амфибола из плагиоклаз-амфиболовых симплектитов (Cam2), наследующего спектр граната.

Fig. 10. Inheritance by clinozoisite (Czo) of the REE distribution spectrum of calcium amphibole from plagioclase-amphibole symplectites (Cam2), which inherits the spectrum of garnet.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Такие особенности клиноцоизитовых амфиболитов проявления Хитоостров как высокое содержание Al в сочетании с пониженными содержаниями Si, Na; повышенное содержание Al в железистом флогопите и кальциевом амфиболе (ряда чермакит–паргасит–саданагаит); широко проявленные реакционные структуры являются свидетельствами метасоматической природы этих пород.

2. Ряд новообразованных минералов (клиноцоизит, кальциевый амфибол ряда чермакит–паргасит–саданагаит) унаследовал спектры распределения REE от замещаемых минералов на участках распространения плагиоклаз-амфиболовых симплектитов вокруг граната: кальциевый амфибол унаследовал спектр замещаемого им граната, а клиноцоизит, в свою очередь – спектр кальциевого амфибола. Под влиянием флюида, вызвавшего метасоматическую переработку гранатовых амфиболитов и образование клиноцоизитовых амфиболитов, LREE становились мобильными и перераспределялись.

Авторы благодарны Е.Н. Терехову (ГИН РАН) за ценные советы, Е.Н. Козлову (ГИ КНЦ РАН) за помощь в организации и проведении полевого сезона, О.Л. Галанкиной (ИГГД РАН) и С.Г. Симакину, Е.В. Потапову (ЯФ ФТИАН) за выполнение

аналитических работ, К.И. Лохову (ВСЕГЕИ) за помощь в геохимических исследованиях, Д.В. Доливо-Добровольскому (ИГГД РАН) за консультации. Замечания рецензентов – Ю.Б. Марина (Горный университет), В.Г. Кривовичева (СПбГУ) и анонимного рецензента позволили существенно улучшить текст статьи. Работа выполнена по теме НИР ИГГД РАН FMUW-2022-0005.

FUNDING

The work was carried out on the subject of IPGG RAS FMUW-2022-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акбарпурян Хайяти С.А., Гульбин Ю.Л., Сироткин А.Н., Гембицкая И.М. Эволюция состава акцессорных минералов REE и Ti в метаморфических сланцах серии Атомфьелла, Западный Нью-Фрисланд, Шпицберген и ее петрогенетическое значение // ЗРМО. **2020**. Т. 149. № 5. С. 1–28.

Акимова Е.Ю., Скублов С.Г. Распределение редкоземельных элементов в породообразующих минералах корундсодержащих пород проявления Хитоостров (Северная Карелия) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. **2021**. Т. 66. № 4. С. 686–705.

Акимова Е.Ю. Флюидные включения в корундсодержащих и вмещающих породах проявления Хитоостров (Северная Карелия) // Мат. XIX Всероссийск. конф. по термобарогеохимии. Новосибирск: ИГМ СО РАН, **2022**. С. 5–6.

Акимова Е.Ю., Кольцов А.Б. Термодинамическое моделирование процесса формирования корундсодержащих метасоматитов Беломорского подвижного пояса (Фенноскандинавский щит) // Петрология. **2022**. Т. 30. № 1. С. 69–90.

Бабарина И.И., Степанова А.В., Азимов П.Я., Серебряков Н.С. Неоднородность переработки фундамента в палеопротерозойском Лапландско-Кольском коллизионном орогене, Беломорская провинция Фенноскандинавского щита // Геотектоника. **2017**. № 5. С. 3–19.

Гаврильчик А.К., Скублов С.Г., Котова Е.Л. Редкоэлементный состав берилла из месторождения Шерловая Гора, Юго-Восточное Забайкалье // ЗРМО. **2021**. Т. 150. № 2. С. 69–82.

Гульбин Ю.Л., Акбарпурян Хайяти С.А., Сироткин А.Н. Минеральный состав и термобарометрия метаморфических пород Западного Нью-Фрисланда, Шпицберген // Записки Горного института. **2023**. Т. 264 (в печати).

Козловский В.М., Бычкова Я.В. Геохимическая эволюция амфиболитов и гнейсов Беломорского подвижного пояса в процессе палеопротерозойского метаморфизма. Геохимия. **2016**. № 6. С. 543–557.

Кривовичев В.Г., Гульбин Ю.Л. Рекомендации по расчету и представлению формул минералов по данным химических анализов // ЗРМО. **2022**. Т. 151. № 1. С. 114–124.

Лебедев В.К., Калмыкова Н.А., Нагайцев Ю.В. Корунд-ставролит-роговообманковые сланцы Беломорского комплекса // Советская геология. **1974**. № 9. С. 78–89.

Румянцева Н.А., Скублов С.Г., Ваништейн Б.Г., Ли С.Х., Ли Ч.Л. Циркон из габброидов хребта Шака (Южная Атлантика): U-Pb возраст, соотношение изотопов кислорода и редкоэлементный состав // ЗРМО. **2022**. Т. 151. № 1. С. 44–73.

Сафонов О.Г., Мельник А.Е., Скублов С.Г. и др. Контрастное поведение редких элементов в гранате при частичном плавлении и субизобарическом остывании (на примере метапелитов Южной Краевой Зоны комплекса Лимпопо, ЮАР) // Геодинамические обстановки и термодинамические условия регионального метаморфизма в докембрии и фанерозое. Мат. V Российск. конф. по проблемам геологии и геодинамики докембрия, Санкт-Петербург. СПб: Springer, **2017**. С. 161–163.

Серебряков Н.С. Петрология корундсодержащих пород чупинской толщи Беломорского подвижного пояса (на примере Чупинского сегмента). Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, **2004**. 30 с.

Серебряков Н.С., Корпечков Д.И. Эволюция кислотности-щелочности при формировании корундсодержащих метасоматитов в метабазах Чупинской толщи Беломорского подвижного пояса // Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи. Мат. конф. посвящ. 110-летию Д.С. Коржинского. М.: ИГЕМ РАН, **2009**. С. 360–363.

Скублов С.Г. Геохимия редкоземельных элементов в породообразующих метаморфических минералах. Санкт-Петербург: Наука, **2005**. 147 с.

Скублов С.Г., Березин А.В., Ризванова Н.Г., Мельник А.Е., Мыскова Т.А. Многоэтапность свекофенского метаморфизма по данным состава и U-Pb возраста титанита из эклогитов Беломорского подвижного пояса // Петрология. **2014**. Т. 22. № 4. С. 405–413.

Скублов С.Г., Гаврильчик А.К., Березин А.В. Геохимия разновидностей берилла: сравнительный анализ и визуализация аналитических данных методами главных компонент (PCA) и сто-

хастического вложения соседей с t-распределением (t-SNE) // Записки Горного института. **2022**. Т. 255. С. 455–469.

Стативко В.С., Скублов С.Г., Смоленский В.В., Кузнецов А.Б. Редкие и редкоземельные элементы в гранатах из силикатно-карбонатных образований Кусинско-Копанского комплекса (Южный Урал) // Литосфера. **2023**. № 2. С. 225–246.

Терехов Е.Н. Особенности распределения РЗЭ в корундсодержащих и других метасоматитах периода подъема к поверхности метаморфических пород Беломорского пояса (Балтийский щит) // Геохимия. **2007**. № 4. С. 411–428.

Терехов Е.Н., Левицкий В.И. Геолого-структурные закономерности размещения корундовой минерализации в Северо-Западном Беломорье // Изв. вузов. Геология и разведка. **1991**. № 6. С. 3–13.

Файф У., Прайс Н., Томпсон А. Флюиды в земной коре. М.: Мир, **1981**. 436 с.

Щербакова Т.Ф., Терехов Е.Н., Куклей Л.Н. Метасоматический эпидит в апоамфиболитовых породах – индикатор тектонических процессов, связанных с эксгумацией пород беломорского пояса (петрография, геохимия) // Геохимия. **2021**. Т. 66. № 12. С. 1123–1135.

Mineralogy of Clinozoisite Amphibolites in the Khitoostrov Occurrence of Corundum-Bearing Rocks (Fenno-Scandinavian Shield)

E. Yu. Akimova^{a, *} and S. G. Skublov^{b, c, **}

^a*Institute of Earth Sciences, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*

^b*Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, Saint-Petersburg, Russia*

^c*Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia*

*e-mail: e.akimova@spbu.ru

**e-mail: skublov@yandex.ru

A study of composition of minerals (major and rare-earth elements) of clinozoisite amphibolites closely associated with corundum-bearing rocks at the Khitoostrov occurrence (North Karelia) was carried out. The clinozoisite amphibolites contain ferruginous phlogopite containing more Al than the ferruginous phlogopite in the host garnet amphibolites; calcium amphibole belongs to the chermakite–pargasite–sadanagaite series; the basic plagioclase which is absent in the host rocks, and margarite. Reactionary relationships of minerals are noted – plagioclase-amphibole symplectites around garnet porphyroblasts, development of clinozoisite after calcium amphibole. Some of the minerals (clinozoisite, calcium amphibole) acquire rare-earth elements (REE) distribution spectra that are uncharacteristic for them, inheriting them from substitutable minerals in the areas of distribution of reaction structures: calcium amphibole inherits the spectrum of garnets, and clinozoisite inherits the spectrum of calcium amphibole. The hypothesis of metasomatic origin of clinozoisite amphibolites and the redistribution of REE under the influence of fluid are discussed.

Keywords: Belomorian mobile belt, clinozoisite, amphibolites, rare earth elements, fluids, metasomatism

REFERENCES

Akbarpuran Haiyati S.A., Gulbin Yu.L., Sirotkin A.N., Gembitskaya I.M. Compositional evolution of REE- and Ti-bearing accessory minerals in metamorphic schists of Atomfjella Series, Western Ny Friesland, Spitsbergen and its petrogenetic significance. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2020**. Vol. 149. N 5. P. 1–28 (in Russian, English translation: Geol. Ore Deposits. 2021. Vol. 63. N 7. P. 634–653).

Ague J.J. Element mobility during regional metamorphism in crustal and subduction zone environments with a focus on the rare earth elements (REE). *Amer. Miner.* **2017**. Vol. 102. P. 1796–1821.

Akimova E.Yu., Skublov S.G. Distribution of rare-earth elements in rock-forming minerals of corundum-bearing rocks of the Khitoostrov deposit (North Karelia). *Vestnik Saint Petersburg Univers. Earth Sci.* **2021**. Vol. 66. N 4. P. 686–705 (in Russian).

Akimova E.Yu. Fluid inclusions in corundum-bearing and host rocks of the Khitoostrov deposit (North Karelia). In: *Proc. XIX All-Russian Conf. Thermobarogeochemistry*. Novosibirsk: IGM SB RAS, **2022**. P. 5–6 (in Russian).

- Akimova E.Yu., Kol'tsov A.B. Thermodynamic modeling of the formation of corundum-bearing metasomatic rocks in the Belomorian Mobile Belt, Fennoscandian Shield. *Petrology*. **2022**. Vol. 30. P. 60–81.
- Armbruster T.H., Bonazzi P., Akasaka M. et al. Recommended nomenclature of epidote-group minerals. *Eur. J. Miner.* **2006**. Vol. 18. P. 551–567.
- Babarina I.I., Stepanova A.V., Azimov P.Ya., Serebryakov N.S. Heterogeneous basement reworking during Paleoproterozoic collisional orogeny within the Belomorian Province, Fennoscandian Shield. *Geotectonics*. **2017**. Vol. 51. N 5. P. 463–478.
- Bau M. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium. *Chem. Geol.* **1991**. N 93. P. 219–230.
- Beinlich A., Klemm R., John T., Gao J. Trace-element mobilization during Ca-metasomatism along a major fluid conduit: Eclogitization of blueschist as a consequence of fluid–rock interaction. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **2010**. Vol. 74. P. 1892–1922.
- Bindeman I.N., Serebryakov N.S., Schmitt A.K. et al. Field and microanalytical isotopic investigation of ultradepleted in ^{18}O Paleoproterozoic “Slushball Earth” rocks from Karelia, Russia. *Geosphere*. **2014**. Vol. 10. P. 308–339.
- Bucher K., Grapes R. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks* (8th ed.). Springer Berlin Heidelberg, **2011**. 428 p.
- Centrella S., Austrheim H., Putnis A. Mass transfer and trace element redistribution during hydration of granulites in the Bergen Arcs, Norway. *Lithos*. **2016**. Vol. 262. P. 1–10.
- Clarke G.L., Schroter F.C., Stevenson J.A. High-P partial melting of dioritic gneiss: LA-ICPMS analysis of Pembroke granulite mineralogy, Fiordland, New Zealand. *GSA. Abs. Progr.* **2003**. Vol. 35. N 6. P. 222.
- Cortesogno L., Gaggero L., Zanetti A. Rare earth and trace elements in igneous and high-temperature metamorphic minerals of oceanic gabbros (MARK area, Mid-Atlantic Ridge). *Contrib. Miner. Petrol.* **2000**. Vol. 139. P. 373–393.
- Frei D., Liebscher A., Franz G., Dulski P. Trace element geochemistry of epidote minerals. *Rev. Miner. Geochem.* **2004**. Vol. 56. N 1. P. 553–605.
- Fyfe U., Price N., Thompson A. *Fluids in the Earth's crust*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam–Oxford–New York, **1978**.
- Gavrilchik A.K., Skublov S.G., Kotova E.L. Trace element composition of beryl from the Sherlovaya Gora deposit, South-Eastern Transbaikalia, Russia. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)* **2021**. Vol. 150. N 2. P. 69–82 (in Russian, English translation: *Geol. Ore Deposits*. **2022**. Vol. 64. N 7. P. 442–451).
- Gulbin Yu.L., Akbarpuran Haiyati S.A., Sirotkin A.N. Mineral composition and thermobarometry of metamorphic rocks in Western Ny Friesland, Spitsbergen. *J. Mining Inst.* **2023**. Vol. 264 (in press).
- Haas J., Shock E.L., Sassani D. Rare earth elements in hydrothermal systems: estimates of standard partial molal thermodynamic properties of aqueous complexes of the rare earth elements at high pressures and temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*. **1995**. Vol. 59. P. 4329–4350.
- Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.E. et al. Nomenclature of the amphibole supergroup. *Amer. Miner.* **2012**. Vol. 97. N 11–12. P. 2031–2048.
- Huang J., Xiao Y. Element mobility in mafic and felsic ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie UHP Orogen, China: insights into supercritical liquids in continental subduction zones. *Int. Geol. Rev.* **2015**. Vol. 57. P. 1103–1129.
- Koga K., Shimizu N., Grove T. Disequilibrium trace element re-distribution during garnet to spinel facies transformation. In: *International Kimberlite Conference: Extended Abstracts*. **1998**. Vol. 7. N 1. P. 443–445.
- Kozlovskii V.M., Bychkova Ya.V. Geochemical evolution of amphibolites and gneisses of the Belomorian mobile belt during Paleoproterozoic metamorphism. *Geochem. Int.* **2016**. Vol. 54. P. 529–542.
- Krivovichev V.G., Gulbin Yu.L. Recommendations for mineral formula calculations from chemical analytical data. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Sci.)*. **2022**. Vol. 151. N 1. P. 114–124 (in Russian).
- Lebedev V.K., Kalmykova N.A., Nagaitsev Yu.V. Corundum-staurolite-hornblende schists of the Belomorian Complex. *Soviet Geol.* **1974**. N 9. P. 78–89 (in Russian).
- Levashova E.V., Mamykina M.E., Skublov S.G., Galankina O.L., Li Q.-L., Li X.-H. Geochemistry (TE, REE, Oxygen) of zircons from leucogranites of the Belokurikhinsky massif, Gorny Altai, as indicator of formation conditions. *Geochem. Int.* **2023** (in press).
- Likhanov I.I. Mass-transfer and differential element mobility in metapelites during multistage metamorphism of the Yenisey Ridge, Siberia. In: *Metamorphic Geology: Microscale to Mountain Belts* (Eds. S. Ferrero, P. Lanari, P. Goncalves, E.G. Grosch). *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* **2018**. Vol. 478. SP478–11.
- Louvel M., Bordage A., Testemale D. et al. Hydrothermal controls on the formation of REE deposits: insights from in situ XAS study of REE (Nd, Gd, Yb) solubility and speciation in high temperature fluids ($T < 600\text{ }^{\circ}\text{C}$). *SGA Conf. Mat.* **2015**.
- McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth. *Chem. Geol.* **1995**. Vol. 120. P. 223–253.
- Migdisov A., Williams-Jones A.E., Brugger J. et al. Hydrothermal transport, deposition, and fractionation of the REE: Experimental data and thermodynamic calculations. *Chem. Geol.* **2016**. Vol. 439. P. 13–42.

Rieder M., Cavazzini G., D'yakonov Y.S. et al. Nomenclature of the micas. *Canad. Miner.* **1998**. Vol. 36. N 3. P. 905–912.

Rumyantseva N.A., Skublov S.G., Vanshtein B.G., Li X.-H., Li Q.-L. Zircon from gabbroids of the Shaka ridge (South Atlantic): U-Pb age, oxygen isotope ratios and trace element composition. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)* **2022**. Vol. 151. N 1. P. 44–73 (in Russian).

Safonov O.G., Melnik A.E., Skublov S.G. et al. Contrast behavior of rare elements in garnet during partial melting and subisobaric cooling (on the example of metapelites of the Southern Marginal Zone of the Limpopo complex, South Africa). In: *Geodynamic conditions and thermodynamic conditions of regional metamorphism in the Precambrian and Phanerozoic. Proc. V Russian Conf. Problems Precambrian Geol. Geodynamics, Saint Petersburg*. Saint Petersburg: Springer, **2017**. P. 161–163 (in Russian).

Sassi R., Harte B., Carswell D.A., Yujing H. Trace element distribution in Central Dabie eclogites. *Contrib. Miner. Petrol.* **2000**. Vol. 139. P. 298–315.

Serebryakov N.S. Petrology of the Corundum-Bearing Rocks of the Chupa Succession of the Belomorian Mobile Belt. PhD Syn. Moscow: IGEM RAS, **2004** (in Russian).

Serebryakov N.S., Korpechikov D.I. Evolution of acidity-alkalinity during the formation of corundum-bearing metasomatites in the metabasites of the Chupa sequence of the Belomorian mobile belt. In: *Physico-chemical factors of petro- and ore genesis: new frontiers. Conf. dedicated 110th anniversary of D.S. Korzhinskii*. Moscow: IGEM RAS, **2009**. P. 360–363 (in Russian).

Shcherbakova T.F., Terekhov E.N., Kuklei L.N. Metasomatic epidote in amphibolite-replacing rocks: An Indicator of tectonic processes related to the exhumation of rocks of the Belomorian Belt (petrography and geochemistry). *Geochem. Int.* **2021**. Vol. 59. P. 1157–1169.

Skublov S.G. Geochemistry of the rare-earth elements in the rock-forming minerals. Saint Petersburg: Nauka, **2005** (in Russian).

Skublov S.G., Berezin A.V., Rizvanova N.G., Mel'nik A.E., Myskova T.A. Multistage Svecofennian metamorphism: Evidence from the composition and U-Pb age of titanite from eclogites of the Belomorian Mobile Belt. *Petrology*. **2014**. Vol. 22. P. 381–388.

Skublov S.G., Drugova G.M. Patterns of trace-element distribution in calcic amphiboles as a function of metamorphic grade. *Canad. Miner.* **2003**. Vol. 41. P. 383–392.

Skublov S.G., Gavrilchik A.K., Berezin A.V. Geochemistry of beryl varieties: comparative analysis and visualization of analytical data by principal component analysis (PCA) and t-distributed stochastic neighbor embedding (t-SNE). *J. Mining Inst.* **2022**. Vol. 255. P. 455–469.

Skublov S.G., Rumyantseva N.A., Vanshtein B.G., Li Q., Li X., Rezyukhin D.I. Zircon xenocrysts from the Shaka Ridge record ancient continental crust: New U-Pb geochronological and oxygen isotopic data. *J. Earth Sci.* **2022**. Vol. 33. N 1. P. 5–16.

Stativko V.S., Skublov S.G., Smolensky V.V., Kuznetsov A.B. Trace and rare-earth elements in garnets from silicate-carbonate formations of the Kusinsko-Kopansky complex (Southern Urals). *Lithosphere*. **2023**. Vol. 23. N 2. P. 225–246 (In Russian).

Stepanova A.V., Stepanov V.S., Larionov A.N., Salnikova E.B., Samsonov A.V., Azimov P., Egorova S.V., Babarina I.I., Larionova Yu.O., Sukhanova M.A., Kervinen A.V., Maksimov O.A. Relicts of Paleoproterozoic LIPs in the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield: barcode reconstruction for a deeply eroded collisional orogen. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* **2022**. Vol. 518. N 1. P. 101–128.

Terekhov E.N. REE distribution in corundum-bearing and other metasomatic rocks during the exhumation of metamorphic rocks of the Belomorian Belt, Baltic Shield. *Geochem. Int.* **2007**. Vol. 45. N 4. P. 364–380.

Terekhov E.N., Levitskii V.I. Geological-structural tendencies in the distribution of corundum mineralization in the northwestern Belomorian region. *Izvestiya. Geol. Res.* **1991**. N 6. P. 3–13 (in Russian).

Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *Amer. Miner.* **2010**. Vol. 95. P. 185–187.