

ПРОГРАДНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АМФИБОЛИТОВ В ЭКЛОГИТЫ И ЭКЛОГИТОПОДОБНЫЕ ПОРОДЫ В УСЛОВИЯХ НИЗКОБАРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭКЛОГИТОВОЙ ФАЦИИ (на примере Беломорского подвижного пояса)

В.М. Козловский^{1,3}, Л.Я. Аранович¹, Н.И. Фришман²

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 35, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, 119034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119899, Москва, Ленинские горы, Россия

Проведено исследование плагиоклазсодержащих гранат-омфацитовых (Grt-Omp) эклогитов и гранат-авгитовых (Grt-Aug) эклогитоподобных кристаллосланцев, залегающих в толще амфиболитов и гнейсов Беломорского подвижного пояса (БПП). Установлено, что Grt-Omp эклогиты и Grt-Aug эклогитоподобные породы в БПП распространены на весьма широкой площади. В большинстве изученных объектов они сохранили первичные согласные соотношения с вмещающими толщами амфиболитов и гнейсов, не нарушены поздними тектоническими процессами и генетически не связаны с зонами тектонического меланжа. Протолитом Grt-Omp эклогитов и Grt-Aug эклогитоподобных пород являлись линзы амфиболитов в гнейсах или крупные мафические зоны, сложенные амфиболитами. Grt-Omp эклогиты были сформированы в низкобарическом поле эклогитовой фации при $P = 12.5\text{—}13.0$ кбар и $T = 600\text{—}630$ °C, а Grt-Aug эклогитоподобные породы — на границе амфиболитовой и эклогитовой фаций в интервале давления 9.6—11.1 кбар и температуры 630—700 °C при интенсивном воздействии на амфиболиты метаморфического флюида. Эволюция составов породообразующих минералов при образовании Grt-Omp эклогитов и Grt-Aug эклогитоподобных пород проходила по единой схеме. Петрографическое разнообразие апоамфиболитовых пород (Grt-Omp эклогиты и Grt-Aug кристаллосланцы) может быть обусловлено как различиями в валовом составе метабазитового протолита, так и различным отношением активностей a_{CaO}/a_{Na_2O} в метаморфическом флюиде. Относительно низкое содержание CaO приводит к образованию Grt-Omp ассоциации собственно эклогитов. Более высокая концентрация CaO инициирует формирование Grt-Aug эклогитоподобных пород, содержащих бедный жадеитовой составляющей клинопироксен.

Высокобарный метаморфизм, термобарометрия, эклогиты, амфиболиты.

PROGRADE TRANSFORMATIONS OF AMPHIBOLITES INTO ECLOGITES AND ECLOGITE-LIKE ROCKS IN THE LOW-PRESSURE FIELD OF THE ECLOGITE FACIES (by the example of the Belomorian Mobile Belt)

V.M. Kozlovskii, L.Ya. Aranovich, and N.I. Frishman

Plagioclase-bearing garnet-omphacite (Grt-Omp) eclogites and garnet-augite (Grt-Aug) eclogite-like schists from the amphibolite and gneiss beds of the Belomorian Mobile Belt (BMB) have been studied. They are spread over a large area. In most of the studied objects, these rocks have preserved primary concordant relations with the host amphibolite and gneiss strata; they are not disturbed by late tectonic processes and are not genetically related to tectonic-melange zones. Their protoliths were amphibolite lenses in gneisses or large mafic zones composed of amphibolites. The Grt-Omp eclogites formed in the low-pressure field of the eclogite facies ($P = 12.5\text{—}13.0$ kbar, $T = 600\text{—}630$ °C), and the eclogite-like Grt-Aug rocks, at the boundary between the amphibolite and eclogite facies ($P = 9.6\text{—}11.1$ kbar, $T = 630\text{—}700$ °C), under the intense impact of metamorphic fluid on the amphibolites. The compositional evolution of the rock-forming minerals during the formation of Grt-Omp eclogites and eclogite-like Grt-Aug rocks followed the same scheme. The petrographic diversity of apoamphibolite rocks (Grt-Omp eclogites and Grt-Aug schists) might be due to the difference both in the bulk composition of the metabasic protolith and in the ratios of CaO and Na₂O activities in the metamorphic fluid. The relatively low content of CaO leads to the formation of Grt-Omp paragenesis in eclogites. Higher CaO contents give rise to eclogite-like Grt-Aug rocks containing jadeite-poor clinopyroxene.

High-pressure metamorphism, thermobarometry, eclogites, amphibolites

ВВЕДЕНИЕ

Находки омфацитсодержащих эклогитов и внешнесходных с ними гранат-авгитовых (эклогитоподобных) кристаллосланцев в раннедокембрийских метаморфических комплексах вызывают особый интерес у геологов, поскольку они часто рассматриваются как индикаторы низкоградиентного плит-текто-

© В.М. Козловский, Л.Я. Аранович, Н.И. Фришман, 2015

DOI: 10.15372/GIG20150503

нического режима на ранних стадиях становления земной коры. В пределах Беломорского подвижного пояса Северной Карелии (БПП) за последние 10 лет были описаны эклогиты, образующие геологические тела двух типов: 1 — дезинтегрированные фрагменты в зонах тектонического меланжа [Володичев и др., 2004, 2011; Слабунов, 2008] или более крупные будинированные тела, залегающие среди обычных гнейсов [Каулина и др., 2010; Минц и др., 2010; Скублов и др., 2011б; Щипанский и др., 2012], также находящиеся, по мнению указанных авторов, в тектонических соотношениях с гнейсами; 2 — эклогитизированные базитовые секущие дайки в кислых породах, с которыми они имеют интрузивные контакты [Травин, Козлова, 2005; Степанов, Степанова, 2006, 2009; Козловский, Аранович, 2008, 2010; Володичев и др., 2008; Travin, Kozlova, 2009; Володичев, Кузенко, 2010; Конилов, Докукина, 2011].

Несмотря на то, что геологическая позиция и петрология эклогитов обоих типов достаточно подробно рассмотрена в литературе, среди геологов нет единого мнения ни о генезисе эклогитов, ни о возрасте их протолита и собственно метаморфизма. Полученные в последнее время многочисленные и по-разному интерпретируемые данные об изотопном возрасте эклогитовых цирконов являются предметом острой дискуссии [Володичев и др., 2004, 2008, 2011; Слабунов, 2008; Докукина и др., 2009, 2010, 2012; Минц и др., 2010; Володичев, Кузенко, 2010, 2012; Скублов и др., 2011а,б, 2012; Березин и др., 2012; Хервартц и др., 2012].

Результаты всех перечисленных выше исследований основаны на изучении эклогитов, находящихся преимущественно в тектонических соотношениях с вмещающими породами, как правило, в виде дезинтегрированных фрагментов в зонах меланжа. Ни одна из моделей не учитывает, что Grt-Omp эклогиты и Grt-Aug эклогитоподобные породы имеют с вмещающими толщами амфиболитов и гнейсов первичные геологические взаимоотношения (субстратиформные линзы, жилы и микропрожилковые зоны), не нарушенные более поздними тектоническими процессами. Эти взаимоотношения неоднократно наблюдались на разных объектах [Козловский, 2010, 2011а]. Поэтому для уточнения существующих моделей в данной статье представлены результаты исследований, в задачу которых входило:

— установить распространенность Grt-Omp эклогитов и Grt-Aug пород за пределами зон тектонического меланжа среди нормально залегающих пород пояса и охарактеризовать их геологические соотношения с вмещающими амфиболитами и гнейсами;

— определить петрографическое разнообразие всех типов Grt-Cpx пород и изучить эволюцию состава породообразующих минералов и минеральных парагенезисов;

— реконструировать физико-химические условия формирования Grt-Cpx пород.

С целью поиска Grt-Cpx пород вне зон тектонического меланжа были изучены метаморфические толщи вдоль двух субширотных профилей, направленных перпендикулярно к простиранию структур восточного домена БПП. Первый профиль — в полосе Энгозеро — Кузема ($\approx 65^{\circ}40'$ с.ш.), второй — в полосе Красная губа — губа Кив — оз. Верхнее Пулонгское — Пояконда ($\approx 66^{\circ}30'$ с.ш.). Кроме того, был проведен субмеридиональный профиль вдоль трассы Санкт-Петербург—Мурманск от р. Поньгома на юге до пос. Лесной на севере по ≈ 32 — 33° в.д.

СОСТАВ, ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ТЕЛ Grt-Omp ЭКЛОГИТОВ И Grt-Aug ЭКЛОГИТОПОДОБНЫХ ПОРОД И ИХ СООТНОШЕНИЕ С ВМЕЩАЮЩИМИ МЕТАМОРФИЧЕСКИМИ ТОЛЩАМИ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БПП

На карте, составленной С.Ю. Колодяжным [2006] (рис. 1), нанесены ранее известные места находок Grt-Omp эклогитов и Grt-Aug эклогитоподобных пород¹ в восточной части БПП (Гридино, Салма, Куру-Ваара), а также вновь выявленные нами участки вдоль специально изученных профилей. Оказалось, что эклогиты и эклогитоподобные породы распространены более широко, чем предполагалось ранее — практически по всей ширине БПП, а не только в узкой северо-восточной части и в зоне сочленения с Кольским геоблоком. В большинстве новых проявлений эклогиты и эклогитоподобные кристаллосланцы сохранили первичные геологические соотношения с вмещающими амфиболитами и гнейсами, которые не нарушены более поздними процессами образования тектонического меланжа.

Все новые находки эклогитов и эклогитоподобных пород геологически приурочены либо к выходам протяженных меланократовых толщ амфиболитов, являющихся составными элементами древних зеленокаменных поясов [Слабунов, 2008], либо ассоциируют с отдельными линзами амфиболитов в гнейсах. Среди амфиболитов эклогиты и эклогитоподобные кристаллосланцы распространены неравномерно, прослеживаясь в сериях обнажений на протяжении нескольких километров на участках Красная

¹ Под Grt-Omp эклогитами мы понимаем породы, сформированные в субфации плагиоклазовых эклогитов, по [Кориковский, 2002, 2005; Бушмин, Глебовицкий, 2008], и имеющие состав (%): Omp (30—50), Grt (20—40), Pl (2—5), Qtz (5—10), Amp (10—30). Под Grt-Aug эклогитоподобными породами мы понимаем кристаллосланцы, имеющие состав (%): Aug (30—60), Grt (10—30), Pl (5—30), Qtz (5—10), Amp (5—20), Ep (5—40), Scap (0—5), Cal (5—10). В Grt-Omp эклогитах и Grt-Aug эклогитоподобных породах пику метаморфизма соответствует минеральный парагенезис Cpx + Grt + Pl + Qtz.

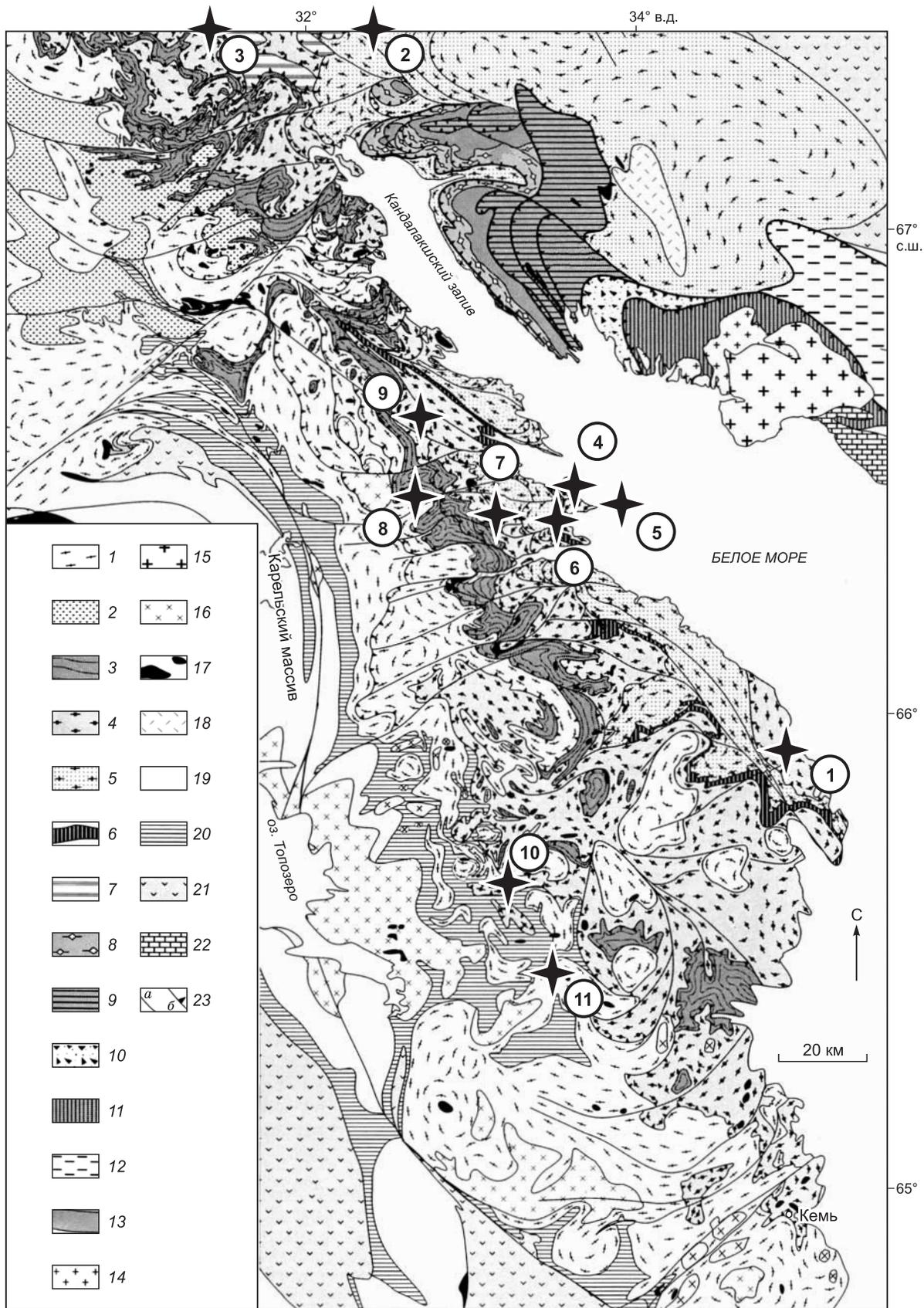


Рис. 1. Схема геологического строения юго-восточной части Беломорско-Лапландского пояса, по [Колодяжный, 2006], с нанесенными объектами высокобарного метаморфизма (по данным авторов).

1—7 — неoarхейские образования Беломорского пояса; 8—15 — палеопротерозойские образования Колвицко-Умбинского сегмента (пояса) Лапландско-Колвицкого пояса; 16—18 — интрузивные образования Беломорского пояса; 19, 20 — неoarхейские образования фундамента Карельского массива; 21 — палеопротерозойские вулканогенно-осадочные образования; 22 — рифейский осадочный чехол; 23 — разрывы: крутопадающие (а) и пологие (б). Подробнее усл. обозн. см. [Колодяжный, 2006]. Цифры в кружках — объекты проявления эклогитов и Grt-Cpx эклогитоподобных высокобарных пород: 1 — Гридино; 2 — Широкая и Узкая Салма; 3 — Куру-Ваара; 4 — Красная губа и Кузокоцкая губа; 5 — о. Большой Кемь-Лудский; 6 — Кив губа; 7 — оз. Верхнее Пулонгское; 8 — Тедино; 9 — Пояконда; 10 — Верхняя Кузема; 11 — Нижняя Кузема.

губа, губа Кив, Кемь-Луды, оз. Верхнее Пулонгское или нескольких десятков километров (профиль от Верхней до Нижней Куземы) (см. рис. 1).

Гранат-омфацитовые эклогиты (табл. 1, ан. КЛ-28-1, КЛ-33) обнаружены преимущественно внутри стратифицированных линз в гнейсах (см. табл. 1, ан. КЛ-40), сложенных меланократовыми амфиболитами (см. табл. 1, ан. КЛ-25-А, КЛ-28-2, КЛ-28-3, КЛ-39). Линзы имеют с гнейсами ясно выраженные согласные контакты (рис. 2, а). Совместно и конформно с линзами, содержащими Grt-Omp эклогиты, в гнейсах залегают линзы амфиболитов (см. табл. 1, ан. КЛ-37) и авгитсодержащих меланократовых амфиболитов без эклогитового парагенезиса. Ширина линз амфиболитов и эклогитсодержащих меланократовых амфиболитов обычно составляет от 0.5 до 15 м при протяженности 2—45 м.

Строение линз меланократовых амфиболитов, в которых обнаружен эклогитовый парагенезис, как правило, неоднородное: Grt-Omp эклогиты формируют сеть многочисленных микропрожилков мощностью 2—10 мм, часто ориентированных несогласно с линейностью вмещающих меланократовых амфиболитов. Между прожилками Grt-Omp эклогитов в виде реликтов остаются участки, сложенные меланократовыми амфиболитами (см. рис. 2, б). В результате тонкого чередования Grt-Omp эклогитов и меланократовых амфиболитов линзы приобретают неявную линзовидно-прожилковую макротекстуру. Регулярно многочисленные мелкие прожилки Grt-Omp эклогитов соединяются вместе и образуют при этом крупные изометричные обособления, достигающие 0.5—0.8 м. В этих обособлениях практически всегда отмечаются реликтовые линейные теневые текстуры, характерные для меланократовых амфиболитов.

Эклогитовые прожилки образуются только по линзам меланократовых амфиболитов. Лейкократовые и мезократовые амфиболиты, встречающиеся в этой же толще, напрямую в эклогиты не переходят. Вначале в этих породах формируются меланократовые линзовидные обособления, обедненные плагиоклазом. После этого внутри этих обособлений появляются домены, содержащие гранат (или гранат и авгит). Впоследствии такие домены трансформируются в микропрожилки Grt-Omp эклогитов. Следовательно, меланократовые амфиболиты можно рассматривать как переходную разновидность между амфиболитами и Grt-Omp эклогитами.

Во вмещающей толще Grt-Vt-Amp гнейсов вблизи участков развития эклогитизированных меланократовых амфиболитов наблюдается уменьшение количества плагиоклаза и возрастание доли роговой обманки, т.е. гнейсы, так же как и амфиболиты, становятся более меланократовыми.

По своему структурному положению во вмещающей толще линзы эклогитизированных амфиболитов в гнейсах достаточно хорошо отличимы от деформированных фрагментов эклогитов из зон тектонического меланжа: первые, как правило, имеют отношение мощности к простиранию 1:7 и более, тогда как вторые обычно изометричны.

Для эклогит-амфиболит-гнейсовой толщи, детально исследованной на участке Кемь-Луды (см. рис. 1), типично северо-восточное или субмеридиональное простирание с небольшим отклонением к северо-западу и весьма крутое падение (75—90°) на восток. Зоны меланжа и расщепления ориентированы к ним практически перпендикулярно [Козловский, 2011б]. Это хорошо известный в Беломорье структурный парагенез, для которого характерно субширотное простирание с небольшим отклонением к северо-западу и пологое падение под углом 5—40°.

Эклогитоподобные Grt-Aug породы (кристаллосланцы) (см. табл. 1, ан. КУЗ-2, КУЗ-3, КУЗ-4) формируют тела двух морфологических разновидностей: 1 — жилообразные метаморфические Grt-Aug новообразования в амфиболитах, мощность этих жил Grt-Aug пород колеблется от 3 до 50 см, а протяженность по простиранию составляет от 15 см до 3—4 м (см. рис. 2, в); 2 — крупные (40—50 м) микропрожилковые зоны в амфиболитах (см. рис. 2, г), в которых Grt-Aug породы образуют многочисленные мелкие прожилки мощностью 0.5—2.0 см и протяженностью не более 10 см. В отличие от Grt-Omp эклогитов, развивающихся по линзам амфиболитов в гнейсах, жилообразные тела и микропрожилки Grt-

Таблица 1. Химический состав Grt-Omp эклогитов участка Кемь-Луды, Grt-Aug эклогитоподобных пород участка Кузема и вмещающих их амфиболитов и гнейсов

Компонент	Участок Кемь-Луды						Участок Кузема							
	Амфиболиты одно-родные мезократовые без признаков эклопитизации	Гнейсы гранат-амфиболитовые	Амфиболиты меланократовые без эклогитового парагенезиса	Амфиболиты меланократовые, содержащие эклогитовый парагенезис	Апоамфиболитовые эклогиты с реликтовым амфиболом	Амфиболиты одно-родные мезократовые без гранат-клинопироксенового парагенезиса	Апоамфиболитовые гранат-клинопироксеновые эклогитоподобные породы с реликтовым амфиболом							
	КЛ-37	КЛ-8	КЛ-25-А	КЛ-28-3	КЛ-39	КЛ-28-2	КЛ-28-1	КЛ-33	КЛ-34	КУЗ-1	КУЗ-8	КУЗ-2	КУЗ-3	КУЗ-4
SiO ₂ , мас. %	53.94	49.50	52.72	50.85	53.02	51.90	50.48	52.25	51.01	48.49	50.83	47.85	46.14	45.90
TiO ₂	0.85	1.32	1.42	1.19	1.09	1.17	1.16	1.49	1.91	0.99	1.04	0.98	0.91	0.83
Al ₂ O ₃	16.06	14.54	10.79	10.10	9.22	9.88	9.63	10.78	12.36	14.15	16.25	13.01	10.89	11.49
FeO	8.77	12.44	13.28	13.32	13.15	13.34	12.75	13.24	14.77	12.16	8.43	9.27	9.74	10.55
MnO	0.153	0.205	0.197	0.199	0.216	0.208	0.207	0.202	0.233	0.266	0.211	0.255	0.327	0.338
MgO	6.20	7.22	7.41	8.38	8.97	8.78	9.12	7.21	5.73	6.71	5.51	5.24	5.84	7.39
CaO	8.30	9.10	8.50	11.37	9.99	10.16	11.52	8.41	9.05	12.93	13.05	19.58	21.32	20.07
Na ₂ O	3.32	2.78	3.30	2.31	1.91	2.27	2.54	3.48	1.97	2.02	3.32	1.04	0.82	0.83
K ₂ O	1.02	1.13	0.40	0.33	0.62	0.36	0.37	0.98	0.81	0.25	0.18	0.06	0.02	0.06
P ₂ O ₅	0.18	0.15	0.20	0.12	0.10	0.13	0.15	0.19	0.23	0.06	0.08	0.17	0.07	0.12
S	0.03	0.06	0.06	0.34	<0.02	<0.02	0.40	<0.02	0.03	<0.02	<0.02	0.27	0.15	0.08
Сумма	98.82	98.45	98.28	98.51	98.29	98.20	98.33	98.23	98.10	98.03	98.90	97.73	96.23	97.66
Cr, r/г	141	111	319	388	396	393	387	349	141	249	204	213	216	181
V	138	228	174	157	171	157	155	170	340	270	270	190	186	190
Co	27	57	68	73	61	70	67	69	50	57	49	44	42	46
Ni	86	96	195	244	245	243	251	214	89	115	113	88	92	87
Cu	50	75	38	93	164	69	94	144	224	48	12	333	157	108
Zn	90	139	124	140	120	128	145	126	139	131	85	55	61	71
Rb	22	12	<5	6	10	6	6	22	30	23	<5	7	<5	6
Sr	383	159	413	464	344	382	466	383	159	81	142	120	94	86
Zr	134	98	151	113	117	115	111	126	136	55	65	52	49	44
Ba	181	114	176	85	106	59	65	321	261	44	64	24	16	20
Y	24	25	20	13	17	14	17	16	38	25	27	26	18	21
Nb	7	8	10	7	8	8	6	8	10	6	6	4	4	4

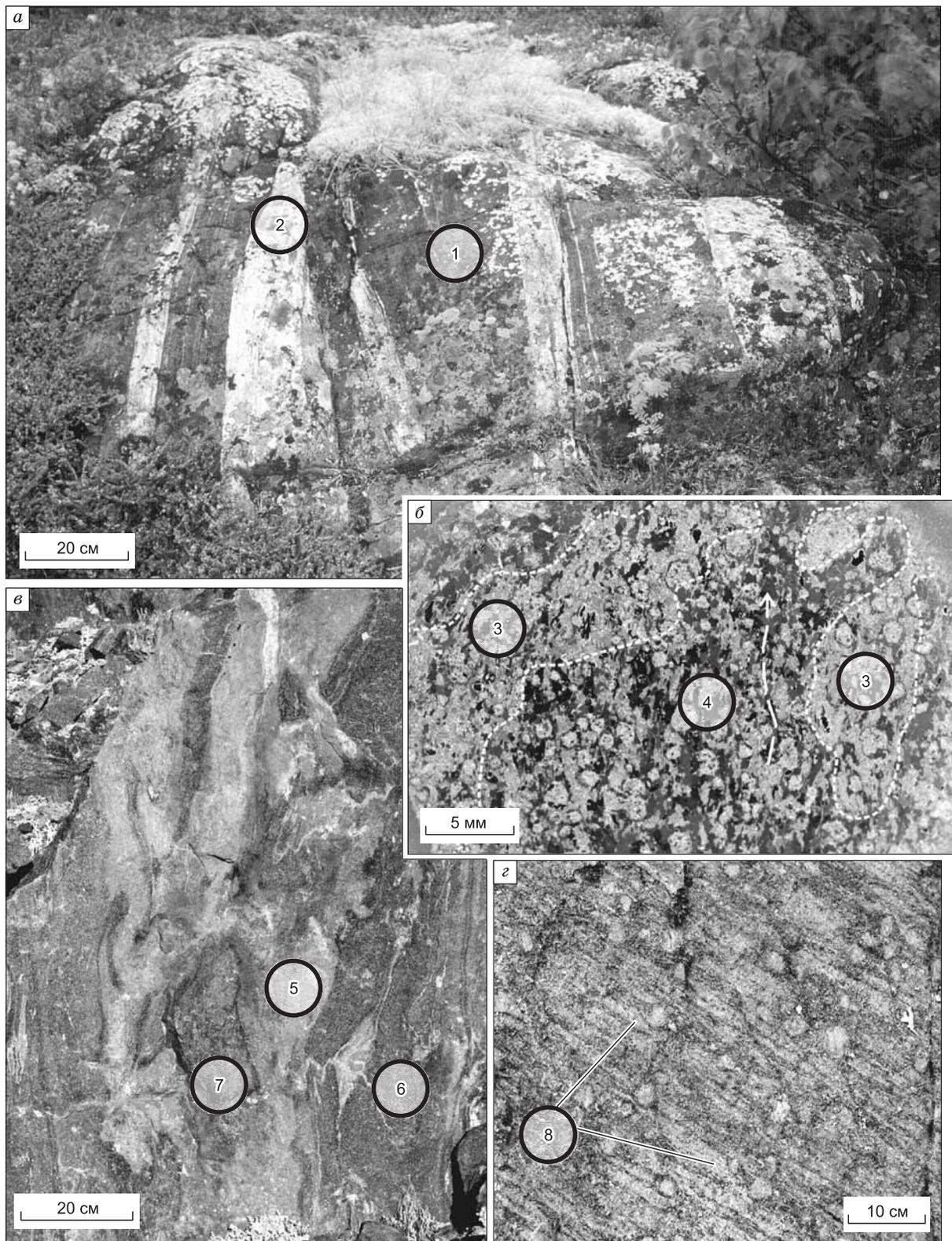


Рис. 2. Первичная морфология геологических тел и структуры Grt-Omp эклогитов и Grt-Aug эклогитоподобных пород.

а — согласные линзы эклогитизированных меланократовых амфиболитов (1) в гнейсах (2); *б* — микропрожилковое строение линзы эклогитизированных меланократовых амфиболитов: Grt-Omp микропрожилки, ориентированные под углом к линейности меланократовых амфиболитов (показана стрелкой), (3); темные участки, сложенные меланократовыми амфиболитами, (4); *в* — жилы Grt-Aug эклогитоподобных пород (5), залегающие в амфиболитах (6) согласно их полосчатости; внутри жил сохраняются ксенолиты амфиболитового протолита (7); *г* — зона микропрожилкового строения в меланократовых амфиболитах, содержащая многочисленные мелкие светлые прожилки Grt-Aug эклогитоподобных пород, (8).

Aug пород локализованы преимущественно в мощных и протяженных толщах амфиболитов древних зеленокаменных поясов (см. табл. 1, ан. КУЗ-1, КУЗ-8). Большинство жил и микропрожилков залегает согласно полосчатости вмещающих амфиболитов. Однако при этом крупные жилоподобные тела Grt-Aug пород имеют неровные ветвящиеся контакты с амфиболитами и содержат реликты измененных (меланократизированных) амфиболитов (см. рис. 2, в). Реже встречаются секущие жилы. В экзоконтакте жилоподобных тел Grt-Aug пород по амфиболитам развивается зона меланократовых амфиболитов, в которых существенно уменьшается количество плагиоклаза. На участках интенсивного развития микропрожилковых Grt-Aug пород в амфиболитах также существенно снижается содержание плагиоклаза.

Значительно реже эклогитоподобные Grt-Aug породы формируются по линзам Bt-Hbl гнейсов, залегающих внутри крупных пачек амфиболитов. Как правило, этот процесс сопровождается уменьшением количества плагиоклаза, что отражается в увеличении меланократовости гнейсов.

Морфология и внутреннее строение тел Grt-Omp эклогитов и особенно Grt-Aug эклогитоподобных пород (см. рис. 2, а—г) позволяет рассматривать их как проявления проградного преобразования амфиболитов, фиксирующего пути просачивания метаморфических флюидов. При этом меланократовые амфиболиты можно рассматривать как начальную стадию этого процесса.

На большинстве исследованных участков морфология линз эклогитизированных амфиболитов и жил эклогитоподобных пород, как правило, не нарушена тектоническими деформациями. Лишь некоторые жилы Пулонгского участка будинированы и растащены на отдельные фрагменты чечевичной формы [Козловский, 2010]. Отдельные тела эклогитизированных амфиболитов и эклогитоподобных Grt-Aug пород могут быть вовлечены в зоны тектонического меланжа или интенсивного рассланцевания [Козловский, 2011а]. Одна из таких пологопадающих субширотных зон прослежена вдоль северного побережья Красной губы и хорошо обнажена на южном берегу о. Большой Кемь-Лудский. В зонах меланжа разрушается первичное субстратиформное строение эклогит-амфиболит-гнейсовой толщи. Геологические тела, сложенные апоамфиболитовыми Grt-Omp эклогитами, при этом приобретают вид изометричных фрагментов разного размера и интенсивно подвергаются вторичной амфиболитизации.

Несоизмеримо больший масштаб проявлений и геологические особенности новых находок субстратифицированных тел апоамфиболитовых Grt-Omp эклогитов и эклогитоподобных Grt-Aug пород принципиально отличают их от широко известных единичных фрагментов (будин) эклогитов в Гридинской зоне тектонического меланжа. Последние можно рассматривать всего лишь как частный случай субстратифицированных линз апоамфиболитовых эклогитов, попавших в одну из зон тектонического меланжа.

По валовому химическому составу (см. табл. 1) видно, что Grt-Omp эклогиты и амфиболиты, служащие для них протолитом, существенно обеднены $\text{CaO} = 8\text{—}11$ мас. % по сравнению с Grt-Aug эклогитоподобными породами и их амфиболитовым протолитом, в которых содержание $\text{CaO} = 12\text{—}21$ мас. %. Это хорошо иллюстрирует диаграмма состав—парагенезис в координатах $\text{Al—Ca—(Mg + Fe + Mn)}$, показывающая смещение треугольника Grt—Cpx—Pl для Grt-Aug-эклогитоподобных пород в сторону Ca вершины (рис. 3, а).

При образовании по амфиболитам меланократовых амфиболитов и Grt-Omp-эклогитов на участке Кемь-Луды в породах возрастает содержание $(\text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO})$, а также Cr, V, Co, Ni, Zn, что наглядно выражено на диаграмме в виде тренда, отражающего базификатную тенденцию (см. рис. 3, б). Такой же тренд эволюции составов пород получен для амфиболитов, меланократовых амфиболитов и Grt-Aug эклогитоподобных пород участка Кузема (см. рис. 3, б) (если из валового состава меланократовых амфиболитов и Grt-Aug эклогитоподобных пород вычесть долю CaO и Al_2O_3 , приходящуюся на вторичные минералы — эпидот и кальцит).

ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ Grt-Omp ЭКЛОГИТОВ (О. БОЛЬШОЙ КЕМЬ-ЛУДСКИЙ) И Grt-Aug ЭКЛОГИТОПОДОБНЫХ ПОРОД (Р. ВЕРХНЯЯ КУЗЕМА) И ЭВОЛЮЦИЯ СОСТАВОВ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ

Многие исследователи беломорских эклогитов отмечают интенсивное развитие амфибола, замещающего минералы эклогитового парагенезиса [Володичев и др., 2004; Козловский, Аранович, 2010; Конилов, Докукина, 2011; Щипанский и др., 2012]. Это связано с тем, что большинство находок эклогитов расположено в зонах тектонического меланжа, рассланцевания и интенсивного щелочного метасоматоза, а также с декомпрессионными ретроградными изменениями. Геологические наблюдения над зонами меланжа показывают, что практически все тела эклогитов и слабометаморфизованных габброноритов, попавшие в эти зоны, одинаково превращаются в высокотемпературные и высокобарные гранатовые амфиболиты [Козловский, Вирюс, 2011]. В наиболее лейкократовых разновидностях метабазитов и во вмещающих гнейсах наблюдаются Grt-Bt-Pl-Kfs-Qtz лейкосомы с признаками плавления. При этом в минералах из интенсивно амфиболитизированных эклогитов и эклогитоподобных пород практически не

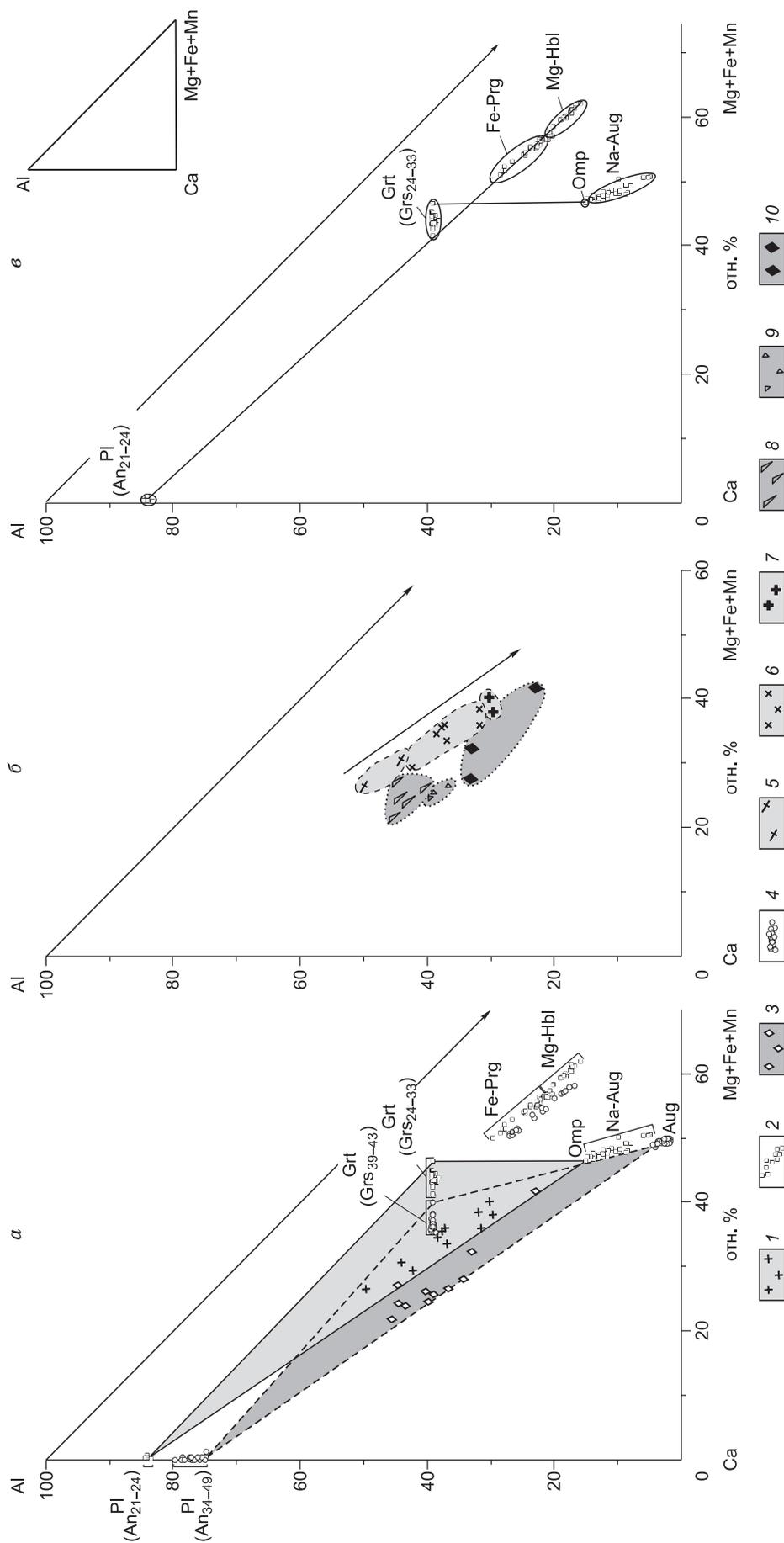


Рис. 3. Фрагменты диаграммы Al—Ca—(Mg + Fe + Mn) для Grt-Omp эклогитов, Grt-Aug эклогитоподобных пород и вмещающих их амфиболитов и меланократовых амфиболитов из различных участков Беломорского подвижного пояса:

a — изменение положения парагенезиса Grt + Crx + Pl в зависимости от валового состава пород и состава минералов; *б* — эволюция составов пород при формировании по амфиболитам меланократовых амфиболитов и Grt-Crx пород; *в* — коннды, иллюстрирующие метаморфические реакции при образовании Grt-Crx ассоциаций. 1 — валовые анализы пород участка Кемь-Луды; 2 — минералы из Grt-Omp эклогитов участка Кемь-Луды; 3 — валовые анализы пород участка Верхняя Кузема; 4 — минералы из Grt-Omp эклогитов участка Верхняя Кузема; 5–7 — породы участка Кемь-Луды: 5 — амфиболиты протолита, 6 — меланократовые амфиболиты, 7 — Grt-Omp эклогиты; 8–10 — породы участка Верхняя Кузема: 8 — амфиболиты протолита, 9 — меланократовые амфиболиты, 10 — Grt-Aug эклогитоподобные породы.

сохраняется зональность, отражающая проградную стадию метаморфизма. В этих минералах обычно можно наблюдать только ретроградную зональность, иллюстрирующую остывание, одновременное с выдвижением пород метаморфического комплекса на уровень средней или верхней коры. Подобные ретроградные тренды типичны для метаблизованных многих высокобарных комплексов.

Однако вне зон меланжа и расслабцевания сохраняются свидетельства проградно-компрессионной истории пород БПП. Например, там весьма часто обнаруживаются реакционные минеральные взаимоотношения, указывающие на то, что Grt-Omp эклогиты и эклогитоподобные Grt-Aug породы формируются при проградном метаморфизме амфиболитов, а не наоборот. Из всех изученных новых объектов (см. рис. 1) наибольшая сохранность проградной истории установлена в Grt-Omp эклогитах на о. Большой Кемь-Лудский и в Grt-Aug эклогитоподобных породах района р. Верхняя Кузема.

Образцы эклогитов, эклогитоподобных и вмещающих пород (всего 47 образцов) изучались в лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии МГУ на растровом электронном микроскопе JSM-6480LV с энергодисперсионной приставкой INCA Energy-350 при ускоряющем напряжении 15 кВ и постоянном токе зонда 15 мА. Время накопления импульсов составляло 120 с. Всего выполнено 630 микронзондовых анализов². Валовой состав пород определялся методом XRF в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН.

Амфиболиты, меланократовые амфиболиты и Grt-Omp эклогиты участка Кемь-Луды. Неэклогитизированные амфиболиты и меланократовые амфиболиты обычно обладают хорошо выраженной линейной ориентировкой длиннопризматических кристаллов амфибола. В некоторых образцах проявлены плоскостные текстуры, ориентированные согласно гнейсовидности вмещающих гнейсов. Новообразованные прожилки Grt-Omp эклогитов в меланократовых амфиболитах характеризуются преимущественно массивной текстурой и пойкилобластовой структурой, обусловленной наличием крупных зерен граната, содержащих многочисленные включения плагиоклаза и роговой обманки. В реликтовых прослоях меланократовых амфиболитов среди Grt-Omp эклогитов сохраняется линейная ориентировка кристаллов амфибола.

Неэклогитизированные амфиболиты имеют лейко- и мезократовый состав с плагиоклазом и роговой обманкой в количестве 40—60 %. Эклогитизированные меланократовые амфиболиты обеднены плагиоклазом, содержание которого опускается примерно до 5 %. В новообразованных эклогитовых доменах внутри меланократовых амфиболитов плагиоклаз встречается только в виде единичных зерен.

В *Са амфиболах* из Grt-Omp эклогитов и обедненных плагиоклазом меланократовых амфиболитов весьма хорошо проявлена проградная зональность, выражающаяся в увеличении к краям содержания Na и Al (рис. 4). Так, центральная часть зерен амфибола соответствует малонатровой Mg-роговой обманке (по классификации [Leake et al., 1997; Hawthorne et al., 2012]) — Mg-Hbl-1 с железистостью $f = 38—42\%$ ³ и невысокой глиноземистостью $Al^{IV} = 0.8—1.22$ и $Al^{VI} = 0.25—0.34$ атомов на формульную единицу (далее а.ф.е.) (табл. 2, обр. КЛ-28, ан. КЛ-2-28-15). Внешняя часть зерен амфибола сложена более натровым эденитом — Ed-2. Он более железистый ($f = 44—47\%$) и существенно более глиноземистый: $Al^{IV} = 1.37—1.64$ и $Al^{VI} = 0.32—0.46$ а.ф.е. (см. табл. 2, обр. КЛ-28, ан. КЛ-2-28-10), чем Mg-Hbl-1 из центра зерна. Количество Na + K позиции А возрастает от центра зерна (0.34—0.45 а.ф.е.) в сторону внешней каймы (0.55—0.66 а.ф.е.).

Амфибол из пойкилитовых включений в омфаците (рис. 5) весьма близок по составу к Ed-2 из внешней каймы зональных кристаллов: $f = 42—49\%$, $Al^{IV} = 1.37—1.59$, $Al^{VI} = 0.30—0.47$ а.ф.е. и $(Na + K)_A = 0.54—0.62$ а.ф.е. (см. табл. 2, обр. КЛ-28, ан. КЛ-2-28-02). Включения амфибола в гранате весьма многочисленны и зональны (рис. 6). Центральная часть включений по составу соответствует Mg-Hbl-1 или Ed-2. Краевая часть включений, непосредственно примыкающая к контакту с гранатом, обладает наиболее высокой железистостью $f = 50—66\%$, наибольшей глиноземистостью $Al^{IV} = 1.78—1.94$, $Al^{VI} = 0.55—0.65$ а.ф.е. и наиболее высоким содержанием $(Na + K)_A = 0.69—0.80$ а.ф.е. (см. табл. 2, обр. КЛ-28, ан. КЛ-2-28-49). По составу она отвечает железистому паргаситу — Fe-Prg-3.

Увеличение глиноземистости амфибола в ряду от Mg-Hbl-1 к Fe-Prg-3 проходило при практически синхронном возрастании Al^{IV} и Al^{VI} за счет реализации двух типов гетеровалентных замещений — $Al^{IV} + Na \Rightarrow Si + \square$ (эденитовое) и $Al^{IV} + Al^{VI} \Rightarrow Si + Mg$ (чермакитовое), а также сопровождалось уменьшением количества плагиоклаза в амфиболите. Эволюция состава амфибола показана на рис. 7, а.

Амфиболы из линз амфиболитов, не затронутых эклогитизацией, отличаются по составу от амфиболов из линз эклогитизированных амфиболитов. При умеренной железистости $f = 39—48\%$, умеренном $Al^{IV} = 1.49—1.73$ а.ф.е. и содержании $(Na + K)_A = 0.40—0.57$ а.ф.е. они характеризуются весьма высоким уровнем $Al^{VI} = 0.62—0.68$ а.ф.е., т.е. преобладанием чермакитового замещения над эденитовым

² В тексте указаны интервалы содержаний компонентов по всей совокупности анализов. В табл. 2—5 приведены только отдельные представительные анализы, использованные в термодинамических расчетах, на рис. 7 вынесена вся совокупность анализов.

³ $f = (Fe^{2+} + Fe^{3+}) / (Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mg) \cdot 100\%$.

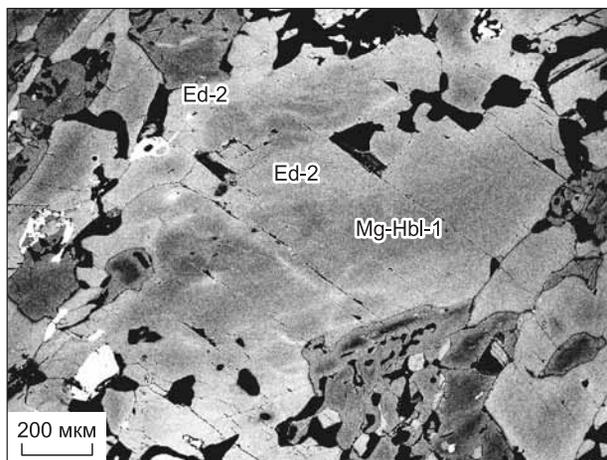


Рис. 4. Зональное строение кристаллов амфиболов из апоамфиболитовых эклогитов.

Центральная часть сложена Mg-роговой обманкой (Mg-Hbl-1), краевая часть и участки вдоль трещин — эденитом (Ed-2).

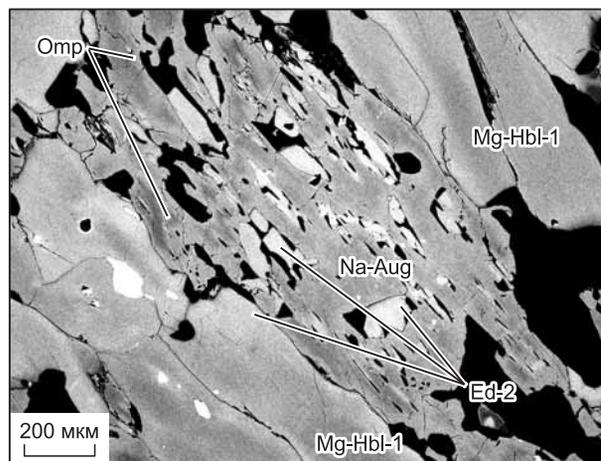


Рис. 5. Неоднородное зональное строение кристаллов клинопироксена в контактах с Hbl и Pl из апоамфиболитовых эклогитов.

Центральная часть кристаллов сложена Na-авгитом (серый) и только узкая краевая зона — омфацитом (темно-серый). Клинопироксен содержит многочисленные реликтовые вросстки Ed-2 из внешней зоны зональных кристаллов амфибола.

(см. табл. 2, обр. КЛ-37, ан. КЛ-37-24). В амфиболах из вмещающих гнейсов прослеживается та же особенность: $f = 57\text{—}59\%$, $Al^{IV} = 1.76\text{—}1.87$, $Al^{VI} = 0.64\text{—}0.85$ а.ф.е., $(Na + K)_A = 0.59\text{—}0.65$ а.ф.е. (см. табл. 2, обр. КГ-36-А, КЛ-40, ан. КГ-36-А-ам-2, КЛ-40-13). Состав амфибола неэклогитизированных амфиболитов соответствует Mg-роговой обманке (Hbl-0), а из гнейсов — Fe-паргаситу [Leake et al., 1997; Hawthorne et al., 2012].

В зонах меланжа и рассланцевания в эклогитах и амфиболитах формируется новый амфибол, который можно легко отличить по составу от эклогитового и протоэклогитового Mg-Hbl-0 → Fe-Prg-3. Он отвечает ферропаргаситу Fe-Prg-4 и обладает сильной дисперсией состава. Основная его особенность состоит в том, что при умеренной железистости $f = 49\text{—}57\%$ Fe-Prg-4 обладает высоким содержанием $Al^{IV} = 1.61\text{—}1.75$ а.ф.е., весьма высоким уровнем $(Na + K)_A = 0.75\text{—}0.85$ а.ф.е. и низкой величиной $Al^{VI} = 0.30\text{—}0.34$ а.ф.е. (см. табл. 2, обр. КЛ-33, ан. КЛ-33-09), т.е. в амфиболе из зон меланжа эденитовое замещение преобладает над чермакитовым. Амфиболы из зон меланжа существенно обогащены калием, содержание которого может достигать 0.13—0.20 ф.е. против 0.05—0.11 ф.е. в амфиболах из амфиболитов вне зон меланжа.

Амфиболы из эклогитов хорошо известного о. Столбиха из Гридинского участка, описанные в литературе [Володичев и др., 2004], по составу весьма похожи на изученные амфиболы о. Большой Кемь-Лудский: большинство характеризуются умеренной железистостью $f = 49\text{—}57\%$ и высоким содержанием $Al^{IV} = 1.35\text{—}1.83$ и $Al^{VI} = 0.46\text{—}0.74$ а.ф.е., а также высоким уровнем $(Na + K)_A = 0.52\text{—}0.83$ а.ф.е. Эти амфиболы относятся к паргаситу и, вероятно, сходны с Fe-Prg-4 о. Большой Кемь-Лудский, сформированными в результате преобразований Mg-Hbl-0 → Fe-Prg-3 в зоне меланжа и рассланцевания. Другая, более малочисленная популяция гридинских амфиболов объединяет низкоглиноземистые и низко-Na-K амфиболы, имеющие $Al^{IV} = 1.02\text{—}1.09$, $Al^{VI} = 0.33\text{—}0.37$ а.ф.е. и $(Na + K)_A = 0.36\text{—}0.43$ а.ф.е. [Володичев и др., 2004]. Эти редкие анализы, по-видимому, отвечают Mg-Hbl-1 и соответствуют началу проградного преобразования предполагаемого амфиболитового протолита.

Клинопироксен появляется в меланократовых амфиболитах, обедненных плагиоклазом, в виде редких короткопризматических кристаллов и изометричных зерен. В этих породах клинопироксен содержит небольшое количество жадеитового минала ($Jd = 4\text{—}6$ мол. %) и по составу отвечает авгиту (табл. 3, обр. ТР-10, ан. ТР-10-30). В апоамфиболитовых Grt-Omp эклогитах количество клинопироксена существенно возрастает. Он формирует длиннопризматические зональные кристаллы (см. рис. 5). Центральная часть кристаллов Сrx с большим количеством включений амфибола отвечает Na-авгиту и содержит 10—19 % Jd (см. табл. 3, обр. КЛ-28, ан. КЛ-1-28-03). Внешняя зона кристаллов обогащена жадеитовым миналом до 20—25 % (см. табл. 3, обр. КЛ-28, ан. КЛ-1-28-09, КЛ-2-28-20) (см. рис. 5). По [Essene, Fyfe, 1967], такие клинопироксены относятся к Na-авгитам, но по официальной классификации [Morimoto et al., 1988], согласно которой 20 % Jd в Сrx является границей между Na-авгитом и омфаци-

Таблица 2. Химический состав амфиболов из Grt-Omp эклогитов, Grt-Aug эклогитоподобных пород и вмещающих их пород Беломорского подвижного пояса

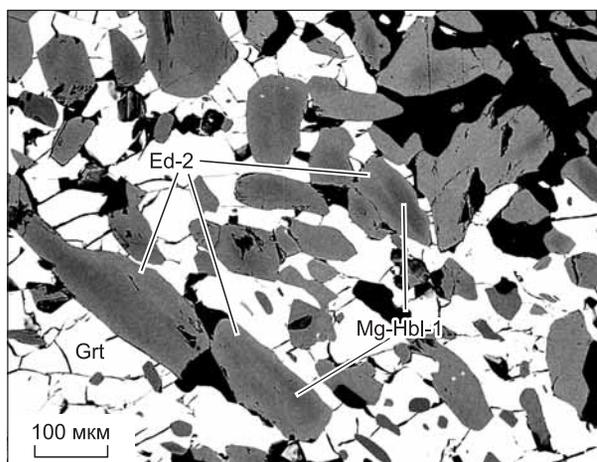
Компонент	Апоамфиболовые Grt-Omp эклогиты						Апоамфиболовые Grt-Aug эклогитоподобные породы			Неэклогитизированные амфиболиты (протолит)			Меланократовые амфиболиты			Гнейсы		Зоны м-ланжа				
	KJL-2-28-10		KJL-2-28-02		KJL-2-28-49		КУЗ-3		КУЗ-4		KJL-37		КУЗ-8		KJL-25		КУЗ-1		КГ-36-а		KJL-40	
	Mg-Hbl	Ed	Ed	Fe-Prg	Mg-Hbl	Mg-Hbl	Mg-Hbl	Mg-Hbl	Mg-Hbl	Mg-Hbl	Mg-Hbl	Mg-Hbl	Ts	Fe-Prg	Ts	Fe-Prg	Fe-Prg		Fe-Prg	Fe-Prg	Fe-Prg	Fe-Prg
SiO ₂ , мас. %	46.38	44.93	43.75	40.38	45.23	45.87	43.59	44.24	40.17	43.23	43.59	44.24	40.17	43.23	43.23	40.43	41.22	43.23	41.22	40.43	40.81	
TiO ₂	0.54	1.35	1.34	0.58	0.44	0.53	0.87	0.74	0.13	0.56	0.87	0.74	0.13	0.56	0.98	0.58	0.98	0.56	0.98	0.58	1.39	
Al ₂ O ₃	8.42	9.66	10.36	13.56	11.10	10.01	12.01	12.85	13.36	13.00	12.01	12.85	13.36	13.00	13.43	14.85	13.43	13.00	13.43	14.85	11.35	
FeO	16.05	16.65	16.82	20.85	17.65	14.29	15.41	15.25	21.53	17.16	15.41	15.25	21.53	17.16	19.30	18.53	19.30	17.16	19.30	18.53	20.52	
MnO	0.22	0.11	0.15	0.20	0.34	0.09	0.23	0.24	0.20	0.29	0.23	0.24	0.20	0.29	0.48	0.50	0.48	0.29	0.48	0.50	0.18	
MgO	12.63	11.69	10.77	8.07	9.96	11.54	10.87	10.99	7.83	9.32	10.87	10.99	7.83	9.32	8.27	7.91	8.27	9.32	8.27	7.91	8.84	
CaO	10.95	11.18	11.06	11.12	11.89	12.09	11.49	11.97	11.13	11.95	11.49	11.97	11.13	11.95	11.86	11.48	11.86	11.95	11.86	11.48	10.66	
Na ₂ O	1.77	2.07	2.24	2.48	1.40	1.39	1.30	1.59	2.11	1.48	1.30	1.59	2.11	1.48	1.35	1.40	1.35	1.48	1.35	1.40	2.63	
K ₂ O	0.38	0.51	0.58	0.90	0.21	0.00	0.94	0.32	0.75	0.37	0.94	0.32	0.75	0.37	1.49	1.26	1.49	0.37	1.49	1.26	1.02	
Сумма	97.34	98.15	97.07	98.14	98.22	95.81	96.71	98.19	97.21	97.36	96.71	98.19	97.21	97.36	98.38	96.94	98.38	97.36	98.38	96.94	97.40	
Si, ф.е.	6.84	6.63	6.55	6.15	6.69	6.85	6.51	6.49	6.19	6.47	6.51	6.49	6.19	6.47	6.24	6.17	6.24	6.47	6.24	6.17	6.25	
Al	1.46	1.68	1.83	2.43	1.93	1.76	2.11	2.22	2.42	2.29	2.11	2.22	2.42	2.29	2.40	2.67	2.40	2.29	2.40	2.67	2.05	
Ti	0.06	0.15	0.15	0.07	0.05	0.06	0.10	0.08	0.02	0.06	0.10	0.08	0.02	0.06	0.11	0.07	0.11	0.06	0.11	0.07	0.16	
Fe ³⁺	0.45	0.38	0.37	0.42	0.26	0.11	0.29	0.25	0.52	0.22	0.29	0.25	0.52	0.22	0.27	0.32	0.27	0.22	0.27	0.32	0.42	
Mg	2.77	2.57	2.40	1.83	2.19	2.57	2.42	2.40	1.80	2.08	2.42	2.40	1.80	2.08	1.87	1.80	1.87	2.08	1.87	1.80	2.02	
Fe ²⁺	1.52	1.67	1.73	2.23	1.92	1.67	1.63	1.62	2.25	1.93	1.63	1.62	2.25	1.93	2.17	2.04	2.17	1.93	2.17	2.04	2.21	
Mn	0.03	0.01	0.02	0.03	0.04	0.01	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.06	0.06	0.06	0.04	0.06	0.06	0.02	
Ca	1.73	1.77	1.77	1.81	1.88	1.93	1.84	1.88	1.84	1.92	1.84	1.88	1.84	1.92	1.92	1.87	1.92	1.92	1.87	1.87	1.75	
Na	0.51	0.59	0.65	0.73	0.40	0.40	0.38	0.45	0.63	0.43	0.38	0.45	0.63	0.43	0.40	0.41	0.40	0.43	0.40	0.41	0.78	
K	0.07	0.10	0.11	0.17	0.04	0.00	0.18	0.06	0.15	0.07	0.18	0.06	0.15	0.07	0.29	0.25	0.29	0.07	0.29	0.25	0.20	
Сумма катионов	15.44	15.54	15.58	15.87	15.41	15.36	15.48	15.48	15.83	15.50	15.48	15.48	15.83	15.50	15.72	15.65	15.72	15.50	15.72	15.65	15.85	
O ²⁻	22.01	22.00	22.00	22.10	22.06	22.00	22.02	22.05	22.23	22.07	22.02	22.05	22.23	22.07	22.13	22.10	22.13	22.07	22.13	22.10	22.01	
ОН ⁻	1.99	2.00	2.00	1.90	1.94	2.00	1.98	1.95	1.77	1.93	1.98	1.95	1.77	1.93	1.87	1.90	1.87	1.93	1.87	1.90	1.99	
f*	0.42	0.44	0.47	0.59	0.50	0.41	0.44	0.44	0.61	0.51	0.44	0.44	0.61	0.51	0.57	0.57	0.57	0.51	0.57	0.57	0.57	

Примечание. Полуэирным — тип амфибола, по [Leake et al., 1997]. Кристаллохимические формулы амфиболов рассчитаны по [Schumacher, 1997].

* $f = (\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}) / (\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mg})$.

Рис. 6. Центральная часть проградно-зонального граната из апоамфиболитовых эклогитов содержит многочисленные пойкилитовые включения зонального амфибола.

Центральная часть включений амфибола сложена Mg горн-блендитом (Mg-Hbl-1), краевая — эденитом (Ed-2) и железистым паргаситом (Fe-Prg-3).



том, эти клинопироксены считаются омфацитами, т.е. краевая часть Сrx обогащена Al и Na и обеднена Fe и Mg (см. рис. 7, а). Железистость клинопироксенов изменяется от центров к краям зерен незначительно, $f = 32—34\%$.

При декомпрессии краевая часть клинопироксена, обогащенная Na, замещается Сrx-Pl симплектитом (рис. 8); в центральной части кристаллов, сложенных менее Na клинопироксеном, симплектиты не образуются. Содержание Jd минала во вторичном Сrx из Сrx-Pl симплектитов 5—8% (см. табл. 3, обр. КЛ-28, ан. КЛ-1-28-11).

Омфациит из фрагментов эклогитов Гридинской зоны имеет более натровый состав, чем на данном участке, содержание Jd в нем достигает 28—32% [Володичев и др., 2004].

Гранат формируется только в Grt-Omp эклогитах и не встречается в неэклогитизированных амфиболитах. Гранат имеет проградную зональность и высокое общее содержание гроссуляра: в центре 30—33%, в краях снижается до 24—29%. При этом содержание и Prg, и Alm возрастает синхронно от центра к краям: Prg от 10—11 до 12—13%, Alm от 53—55 до 56—58% (табл. 4, обр. КЛ-28, ан. КЛ-2-28-59 и КЛ-1-28-19) (см. рис. 7, а). Железистость граната незначительно снижается от центра $f = 81\%$ к краям $f = 76\%$. Содержание спессартина мало и изменяется от 1 до 5 мол. % без видимой связи с зональностью, установленной по другим компонентам.

Гранат из будины эклогитов в зоне меланжа на о. Столбиха (район Гридино), по данным О.И. Володичева с соавторами [2004], также сильно обогащен гроссуляром (Grs = 28—30 мол. %). Однако в нем

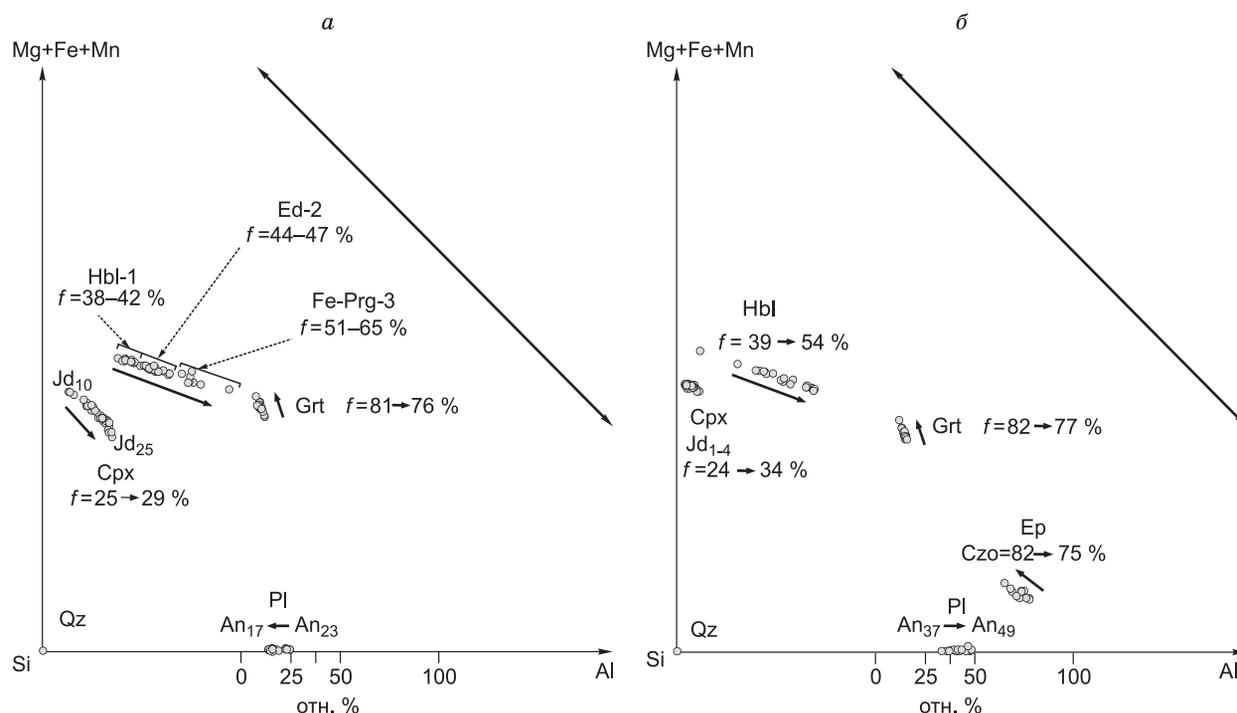


Рис. 7. Фрагменты фазового треугольника (Mg + Fe + Mn)—Si—Al для Grt-Omp эклогитов (а) и Grt-Aug эклогитоподобных пород (б).

Жирными стрелками показана эволюция составов минералов. Пояснение см. в тексте.

Таблица 3. Химический состав клинопироксенов из Grt-Omp эклогитов, Grt-Aug эклогитоподобных пород Беломорского подвижного пояса

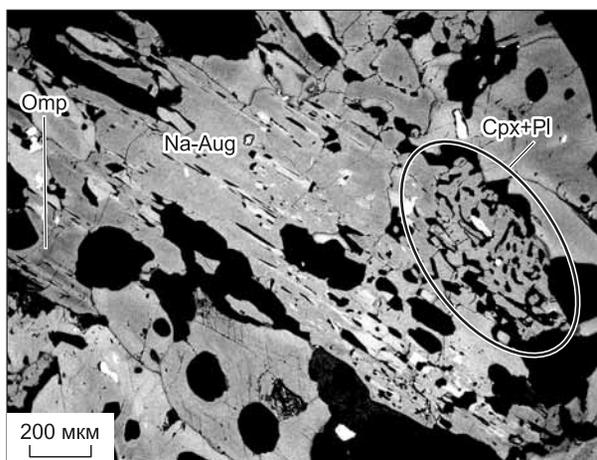
Компонент	Меланократовые амфиболиты		Апоамфиболитовые Grt-Omp эклогиты				Апоамфиболитовые Grt-Aug эклогитоподобные породы							
	Центральные зоны зонных кристаллов		Крайевые зоны зонных кристаллов		Апоамфиболитовые симплектитовые структуры		Центральные зоны зонных кристаллов		Крайевые зоны зонных кристаллов					
	ТР-10	КЛ-28	КЛ-1-28-03	КЛ-28	КЛ-1-28-09	КЛ-2-28-20	КЛ-28	КЛ-1-28-11	КУЗ-3	КУЗ-4	КУЗ-3-05	КУЗ-4-01	КУЗ-3-02	КУЗ-3-08
SiO ₂ , мас. %	51.58	52.94	53.44	53.20	52.87	52.87	52.87	52.29	51.95	51.47	52.04	52.04	52.04	52.04
TiO ₂	0.21	0.10	0.03	0.08	0.21	0.21	0.21	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.10
Al ₂ O ₃	2.69	3.85	5.87	6.11	2.25	2.25	2.25	0.87	1.22	1.44	1.23	1.22	1.44	1.23
FeO	9.03	9.77	9.29	8.88	9.83	9.83	9.83	10.39	9.18	11.11	11.40	9.18	11.11	11.40
MnO	0.32	0.13	0.10	0.09	0.17	0.17	0.17	0.00	0.20	0.20	0.25	0.20	0.20	0.25
MgO	12.12	11.58	10.05	9.86	12.36	12.36	12.36	11.88	12.33	11.38	11.30	12.33	11.38	11.30
CaO	22.76	20.33	17.51	17.16	21.96	21.96	21.96	24.30	23.72	23.62	23.46	23.72	23.62	23.46
Na ₂ O	0.92	2.17	3.65	3.89	1.30	1.30	1.30	0.32	0.55	0.43	0.37	0.55	0.43	0.37
K ₂ O	0.00	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Сумма	99.63	100.91	99.96	99.29	100.97	100.97	100.97	100.05	99.15	99.65	100.15	99.15	99.65	100.15
				60										
Si, ф.е.	1.94	1.96	1.97	1.97	1.96	1.96	1.96	1.98	1.97	1.96	1.97	1.97	1.96	1.97
Al	0.12	0.17	0.26	0.27	0.10	0.10	0.10	0.04	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Ti	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.28	0.30	0.29	0.28	0.31	0.31	0.31	0.33	0.29	0.35	0.36	0.29	0.35	0.36
Mn	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.68	0.64	0.56	0.55	0.68	0.68	0.68	0.67	0.70	0.65	0.63	0.70	0.65	0.63
Ca	0.92	0.80	0.69	0.68	0.87	0.87	0.87	0.98	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
Na	0.06	0.16	0.26	0.28	0.09	0.09	0.09	0.02	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Сумма	4.02	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.01	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02	4.02
O ²⁻	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
f [#]	0.29	0.32	0.34	0.34	0.31	0.31	0.31	0.33	0.29	0.35	0.36	0.29	0.35	0.36
Id***	0.05	0.10	0.22	0.23	0.05	0.05	0.05	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
Actm	0.02	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.02	0.03	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01
Aug	0.93	0.85	0.73	0.72	0.91	0.91	0.91	0.97	0.96	0.97	0.97	0.96	0.97	0.97

Примечание. Содержание миналов Id, Actm, Aug рассчитаны с учетом Fe³⁺, по [Sawthorn, Collerson, 1974].

* f = Fe/(Fe + Mg).

Рис. 8. Симплектитовые Срх-Pl срастания, развивающиеся по омфакиту на внешней части зональных кристаллов Срх.

В центре зональных кристаллов по Na-Aug симплектитовые срастания не развиваются.



установлена только ретроградная зональность, выражающаяся в снижении содержания пиропового и возрастании альмандинового и гроссулярового миналов от центра к периферии зерен.

Гранаты из эклогитизированных даек Fe-метагаббро и метагабброноритов расположенного рядом Красногубского дайкового поля [Козловский, Аранович, 2010] отличаются от гранатов апоамфиболитовых эклогитов существенно более высоким содержанием пироба (20—35 мол. %) и низким содержанием гроссуляра (17—28 мол. %). Это, скорее всего, обусловлено различиями в валовом химическом составе протолитов эклогитизированных пород. Кроме того, большинство гранатов из эклогитизированных даек Красной губы обычно незональны или обладают слабовыраженной ретроградной зональностью.

Плагноклаз в апоамфиболитовых эклогитах встречается в виде единичных зерен неопределенной морфологии, преимущественно в срастании с амфиболом. Состав плагноклаза отвечает олигоклазу с $An = 17—24$ мол. % (табл. 5, обр. КЛ-28, ан. КЛ-1-28-23 и КЛ-2-28-70). Близкий состав $An = 19—21$ мол. % (см. табл. 5, обр. КЛ-25, ан. КЛ-25-14) имеет плагноклаз из меланократовых амфиболитов с высокоглиноземистым амфиболом (железистым паргаситом). В неизменных лейкократовых амфиболитах, обогащенных плагноклазом, состав плагноклаза более основной, $An = 25—30$ мол. % (см. табл. 5, обр. КЛ-37, ан. КЛ-37-28). Это указывает на то, что компрессионное преобразование амфиболитов сопровождалось не только увеличением глиноземистости амфибола и уменьшением количества плагноклаза в породе, но и понижением основности плагноклаза.

Эклогиты и амфиболиты, испытавшие амфиболитизацию в зонах расщепления и меланжа, содержат более кислый плагноклаз, чем эклогиты и амфиболиты вне зон меланжа. Его состав отвечает альбит-олигоклазу, $An = 9—15$ мол. % (см. табл. 5, обр. КЛ-33, ан. КЛ-33-15). Регулярно в зонах меланжа наблюдается замещение эклогитового граната амфибол-биотит-плагноклазовым гранулированным агрегатом.

Приведенные структурно-петрографические соотношения (см. рис. 2—8) и анализы составов минералов (см. табл. 2—5) позволяют определить относительную последовательность формирования минералов и изменение их состава при эклогитизации амфиболитов:

1) за счет увеличения содержания Al и Na в Ca амфиболах их состав меняется от магнезиальной роговой обманки до эденита или ферропаргасита по реакции $Hbl-1 + Pl = Ed-2$ (или $Fe-Prg-3$) (см. рис. 3, в) и сопровождается увеличением их железистости;

2) резко сокращается количество плагноклаза, но полностью он не исчезает;

3) формируется ассоциация $Grt + Na-Aug$ по реакции $Fe-Prg-3 + Pl = Grt + Na-Aug$ (см. рис. 3, в), в которой ферропаргасит сохраняется в виде включений в Grt и Crx;

4) в клинопироксенах возрастают примесь Jd минала и общая железистость; в гранате снижается содержание Grs молекулы, но увеличивается магнезиальность;

5) на декомпрессионном этапе Na-Crx замещается Aug-Pl симплектитам, а высокоглиноземистый Fe-Prg-3 на агрегат $Tr + Ep$.

Амфиболиты, меланократовые амфиболиты и Grt-Aug эклогитоподобные породы участка Верхняя Кузема. Эклогитоподобные Grt-Aug породы (кристаллические сланцы), так же как и Grt-Omp эклогиты, характеризуются однородной массивной текстурой и пойкилобластовой структурой; в штурфах эти породы практически неотличимы. Во вмещающей толще амфиболитов и в переходной зоне, сложенной меланократовыми амфиболитами, развиты преимущественно линейные и плоскостные текстуры. В отличие от Grt-Omp эклогитов, в Grt-Aug-породах обильно представлен парагенезис вторичных минералов — Tr, Ep, Cal, Scap, что дополнительно свидетельствует о высокой роли флюидов при формировании этих пород. Во вмещающих неизменных амфиболитах и меланократовых амфиболитах обнаружен первичный кальцит в количестве 3—5 %, образующий равновесные срастания с амфиболом и плагноклазом.

Таблица 4. Химический состав гранатов и эпидотов из Grt-Omp эклогитов, Grt-Aug эклогитоподобных пород Беломорского подвижного пояса

Компонент	Гранаты										Эпидоты			
	Апоамфиболитовые Grt-Omp эклогиты		Апоамфиболитовые Grt-Aug эклогитоподобные породы		Гранатовые амфиболиты незонированные		Меланократовые гранатовые амфиболиты		Амфибол-гранат-биотитовые гнейсы		Эпидотизированные апоамфиболитовые Grt-Aug эклогитоподобные породы			
	КЛ-28	КЛ-1-28-19	КУЗ-3	КУЗ-03-39	КУЗ-03-42	КУЗ-8	КУЗ-01-07	КЛ-40	КЛ-40-04	КЛ-36-а	КЛ-36-б	КУЗ-3	КУЗ-03-30	КУЗ-04-11
	центр	край	центр	край	незональное зерно	край	край	одинородное зерно	одинородное зерно	одинородное зерно	центр	край	край	
SiO ₂ , мас. %	37.89	38.03	37.98	38.29	38.30	37.98	37.98	37.43	36.73	37.43	37.88	38.00	37.95	
TiO ₂	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.22	0.26	
Al ₂ O ₃	21.13	21.19	21.23	21.26	21.47	21.21	21.21	20.52	21.33	20.52	29.16	28.80	26.75	
FeO	25.02	26.74	22.45	22.54	24.33	22.13	22.13	22.27	22.76	22.27	6.64	6.91	7.36	
MnO	1.62	1.27	1.61	1.21	2.07	0.85	0.85	6.72	7.88	6.72	0.12	0.00	0.12	
MgO	2.61	3.40	1.68	2.31	2.94	2.27	2.27	1.57	1.69	1.57	0.15	0.00	0.13	
CaO	11.84	9.88	14.97	14.63	11.44	14.83	14.83	10.02	8.42	10.02	23.90	23.91	23.34	
Na ₂ O	0.00	0.07	0.06	0.00	0.00	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Сумма	100.11	100.66	99.98	100.24	100.55	99.34	99.34	98.53	98.81	98.53	98.14	97.84	95.91	
Si, ф.ед.	2.99	2.99	2.99	3.00	3.00	3.00	3.00	3.02	2.97	3.02	2.92	2.94	3.00	
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	
Al	1.97	1.96	1.97	1.96	1.98	1.97	1.97	1.95	2.03	1.95	2.65	2.63	2.49	
Fe ²⁺ + Fe ³⁺	1.65	1.76	1.49	1.47	1.59	1.46	1.46	1.50	1.54	1.50	0.43	0.45	0.49	
Mn	0.11	0.08	0.11	0.08	0.14	0.06	0.06	0.46	0.54	0.46	0.01	0.00	0.01	
Mg	0.31	0.40	0.20	0.27	0.34	0.27	0.27	0.19	0.20	0.19	0.02	0.00	0.02	
Ca	1.00	0.83	1.26	1.23	0.96	1.25	1.25	0.87	0.72	0.87	1.97	1.98	1.98	
Na	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Сумма	8.03	8.03	8.03	8.02	8.01	8.02	8.02	8.00	8.00	8.00	8.02	8.01	8.01	
O ²⁻	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.50	12.50	12.50	
Grs	0.33	0.28	0.43	0.41	0.32	0.42	0.42	0.29	0.24	0.29	—	—	—	
Prp	0.10	0.13	0.07	0.09	0.11	0.09	0.09	0.06	0.07	0.06	—	—	—	
Alm	0.53	0.56	0.47	0.48	0.52	0.47	0.47	0.49	0.51	0.49	—	—	—	
Sps	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.02	0.02	0.15	0.18	0.15	—	—	—	
Czo	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.82	0.78	0.68	

Примечание. Кристаллохимические формулы гранатов рассчитаны на 12 O²⁻, эпидотов — на 12.5 O²⁻.

Таблица 5. Химический состав плагиоклазов из Grt-Omp эклогитов и Grt-Aug эклогитоподобных пород Беломорского подвижного пояса

Компонент	Апоамфиболитовые Grt-Omp эклогиты		Апоамфиболитовые Grt-Aug эклогитоподобные породы		Неэклогитизированные амфиболиты и гранатоподобные амфиболиты		Меланократовые амфиболиты и гранатовые амфиболиты		Амфибол-гранат-биотитовые гнейсы				Зоны меланжа	
	KJL-28		KUZ-3		KJL-37	KUZ-8	KJL-25	KUZ-1	KJL-40	KJL-36-a	KJL-36-b		KJL-33	
	KJL-1-28-23	KJL-2-28-70	KUZ-03-15	KUZ-03-43	KJL-37-28	KUZ-08-15	KJL-25-14	KUZ-01-20	KJL-40-11	KJL-36-a-04	KJL-36-6	KJL-33-15		
SiO ₂ , мас. %	63.63	61.78	59.49	57.10	59.87	58.62	62.43	57.90	58.50	60.90	62.25	64.57	64.57	
Al ₂ O ₃	22.90	23.83	25.52	27.13	24.69	26.57	23.35	25.99	25.93	24.45	23.45	21.92	21.92	
FeO	0.14	0.00	0.00	0.00	0.16	0.19	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.30	0.30	
CaO	3.58	4.74	7.19	8.98	6.27	7.95	4.35	7.99	7.63	5.65	5.12	2.86	2.86	
Na ₂ O	9.44	8.75	7.65	6.53	7.91	7.16	9.16	7.16	7.25	8.22	8.33	10.02	10.02	
K ₂ O	0.16	0.14	0.00	0.00	0.04	0.00	0.15	0.05	0.08	0.18	0.17	0.20	0.20	
Сумма	99.85	99.24	99.85	99.74	98.94	100.49	99.44	99.09	99.48	99.40	99.32	99.87	99.87	
An	0.17	0.23	0.34	43.00	0.30	0.38	0.21	0.38	0.37	0.27	0.25	0.13	0.13	
Ab	0.82	0.76	0.66	57.00	0.69	0.62	0.79	0.62	0.63	0.72	0.74	0.85	0.85	
Kfs	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	

Амфиболы эклогитоподобных Grt-Aug пород относятся к магнезиальной роговой обманке. В отличие от амфиболов Grt-Omp эклогитов участка Кемь-Луды, в амфиболах эклогитоподобных пород зональность проявлена менее отчетливо. Характерной чертой этих амфиболов является высокое содержание $Al^{VI} = 0.45—0.77$ а.ф.е. при умеренном $Al^{IV} = 0.93—1.53$ а.ф.е. и $(Na + K)_A = 0.24—0.47$ а.ф.е. (см. табл. 2, обр. КУЗ-3, ан. КУЗ-3-32). Железистость амфиболов увеличивается от центра к краям зерен от 42 до 54 % и становится сопоставимой с железистостью внешней зоны амфиболов из эклогитов (Fe-Prg-3). Как и в Grt-Omp эклогитах участка Кемь-Луды, амфибол эклогитоподобных Grt-Aug пород Куземы встречается во включениях в клинопироксене. При этом его состав не отличается от состава амфибола матрикса (см. табл. 2, обр. КУЗ-4, ан. КУЗ-4-21). Как и в Grt-Omp эклогитах, изменение состава амфиболов Grt-Aug пород проходит вдоль вектора, направленного в сторону граната (см. рис. 7, б).

Вмещающие гранатовые амфиболиты содержат амфибол, близкий по составу к амфиболу из эклогитоподобных пород: $Al^{IV} = 1.43—1.54$, $Al^{VI} = 0.70—0.75$ а.ф.е. и $(Na + K)_A = 0.39—0.45$ а.ф.е. (см. табл. 2, обр. КУЗ-8, ан. КУЗ-8-11). Этот амфибол относится к магнезиочермакиту.

Главной особенностью *клинопироксена* эклогитоподобных Grt-Aug пород, в отличие от клинопироксена Grt-Omp эклогитов, является то, что он содержит всего лишь 1—2 % Jd, т.е. по составу отвечает авгиту (см. табл. 3, обр. КУЗ-3, КУЗ-4, ан. КУЗ-3-05, КУЗ-4-01, КУЗ-3-02, КУЗ-3-08). Стоит отметить, что на участке Верхняя Пулонга в аналогичных породах был обнаружен клинопироксен, содержащий до 7 мол. % Са-чермакитового минала [Козловский, 2010]. На фазовой диаграмме (Fe + Mg + Mn)—Si—Al точки составов клинопироксенов эклогитоподобных пород расположены кучно и никакой зональности, типичной для эклогитовых пироксенов, не обнаруживают (см. рис. 7, б). Зональность зерен клинопироксена Grt-Aug эклогитоподобных пород проявляется только в повышении железистости от центра ($f = 29—33$ %, см. табл. 3, обр. КУЗ-3, КУЗ-4, ан. КУЗ-3-05, КУЗ-4-01) к краям (до $f = 35—36$ %, см. табл. 3, обр. КУЗ-3, ан. КУЗ-3-02, КУЗ-3-08). По железистости клинопироксены эклогитов Кемь-Луды и эклогитоподобных пород Куземы практически одинаковы.

Гранат в эклогитоподобных Grt-Aug породах так же, как и в Grt-Omp эклогитах, формирует крупные (5—8 мм) пойкилобласты, содержащие многочисленные включения практически всех породообразующих минералов: амфибола, кварца, кальцита и плагиоклаза (рис. 9). В то же время в некоторых доменах гранат образует короны вокруг кальцита, плагиоклаза и роговой обманки (рис. 10).

Гранат из Grt-Aug эклогитоподобных пород еще больше обогащен Grs, чем гранат из Grt-Omp эклогитов. Центры зерен граната из Grt-Aug пород содержат многочисленные включения плагиоклаза, кальцита и амфибола (см. рис. 9), а в краевой части включения не

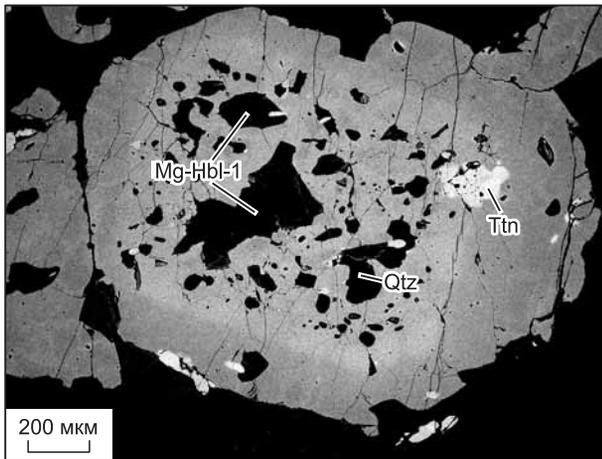


Рис. 9. Проградно-зональный пойкилобласт граната из Grt-Aug эклогитоподобных пород.

Центральная часть кристалла содержит многочисленные реликты минералов амфиболитового протолита. Краевая, более темная зона кристалла обеднена Grt и обогащена Prp и Alm. Пояснения см. в тексте.

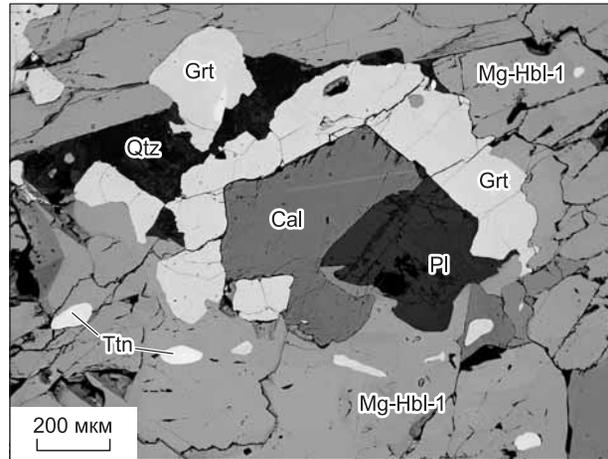


Рис. 10. Коронарная реакционная структура в эклогитоподобных Grt-Aug породах, образованная гранатом, окружающим кальцит с плагиоклазом в контакте с Ca амфиболом.

обнаружены. Проградная зональность в гранате такая же, как и в эклогитах: от центра к краю содержание Grt снижается с 43—41 до 41—39 %, Prp растет от 6—7 до 8—10 %, а Alm увеличивается незначительно от 46—48 до 48—50 % (см. рис. 7, б; табл. 4, обр. КУЗ-3, ан. КУЗ-3-39, КУЗ-3-42). Железистость в том же направлении снижается от 82 до 77 %. Близким составом обладает гранат из меланократовых амфиболитов, формирующихся в экзоконтактовой зоне с жилами Grt-Aug эклогитоподобных пород (см. табл. 4, обр. КУЗ-01, ан. КУЗ-01-07).

Гранаты из вмещающих гранатовых амфиболитов, как и гранаты Grt-Aug эклогитоподобных пород, существенно обогащены гроссуляром. Однако в амфиболитовом гранате зональность практически не проявлена. Обычно он имеет доменное строение: содержание Grt колеблется от 27 до 36 %, Prp от 10 до 13 %, Alm от 46 до 55 %, Sps от 3 до 5 % (см. табл. 4, обр. КУЗ-8, ан. КУЗ-08-24). Железистость граната из гранатовых амфиболитов незначительно снижается от центра к краям от 82 до 81 %.

Плагиоклаз в эклогитоподобных Grt-Aug породах, как и в собственно эклогитах, встречается очень редко в виде отдельных реликтов неопределенной морфологии, расположенных в интерстициях между другими породообразующими минералами или в виде включений в гранате. В отличие от Grt-Omp эклогитов, плагиоклаз эклогитоподобных Grt-Aug пород и вмещающих их амфиболитов существенно более основной и неоднородный по составу. Домены в центральных частях крупных кристаллов обычно более кислые, чем в краевых частях. Состав плагиоклаза в эклогитоподобных Grt-Aug породах отвечает андезину, An = 34—43 мол. % (см. табл. 5, обр. КУЗ-3, ан. КУЗ-03-15, КУЗ-03-43); единичные анализы показывают лабрадор, An = 59—61 мол. %. Во вмещающих гранатовых амфиболитах плагиоклаз практически немного более кислый, чем в эклогитоподобных Grt-Aug породах, и соответствует андезину, An = 30—40 мол. % (см. табл. 5, обр. КУЗ-8, ан. КУЗ-08-15).

Эпидот — вторичный минерал эклогитоподобных Grt-Aug пород. Обычно он формирует мономинеральные гранулированные агрегаты сросшихся короткопризматических кристаллов, замещающих клинопироксен, иногда в симплектитовых срастаниях с кварцем и амфиболом, развивающихся по гранату [Козловский, 2010]. Содержание эпидота в эклогитоподобных породах может достигать до 30 %, в отдельных разновидностях до 60 %.

Состав эпидота близок к клиноцоизиту (Czo). Эпидот зонален: мольная доля клиноцоизита уменьшается от центра кристалла к периферии от 82 до 78 мол. % (см. табл. 4, обр. КУЗ-3, ан. КУЗ-03-11, КУЗ-03-30). В поздних гранат-амфибол-кальцит-кварц-эпидотовых прожилках состав эпидота более железистый; мольная доля клиноцоизита опускается до 68 мол. % (см. табл. 4, обр. КУЗ-4, ан. КУЗ-04-11).

УСЛОВИЯ МЕТАМОРФИЗМА Grt-Omp ЭКЛОГИТОВ И Grt-Aug ЭКЛОГИТОПОДОБНЫХ ПОРОД И ВМЕЩАЮЩИХ АМФИБОЛИТОВ, МЕЛАНОКРАТОВЫХ АМФИБОЛИТОВ И ГНЕЙСОВ

Определение условий метаморфизма, при которых сформировались апоамфиболитовые Grt-Omp эклогиты и Grt-Aug эклогитоподобные породы, проводилось в сравнении с *P-T* параметрами образова-

ния вмещающих амфиболитов и гнейсов. Большинство минералов Grt-Omp эклогитов и Grt-Aug эклогитоподобных Grt-Cpx пород зональны, что позволяет оценивать направление изменения P - T параметров метаморфизма. Для расчетов выбирались наиболее структурно-однородные образцы, в которых главный парагенезис не осложнен декомпрессионными и ретроградными реакционными структурами, указывающими на наложение более поздних процессов.

Оценка P - T условий образования минеральных ассоциаций проводилась для Grt-Omp эклогитов участка Кемь-Луды (обр. КЛ-28), для эклогитоподобных Grt-Aug пород участка Верхняя Кузема (обр. КУЗ-3, КУЗ-4) и Кив губа (обр. КГ-58), а также для вмещающих их толщ амфиболитов участка Кемь-Луды (обр. КЛ-37), гранатовых амфиболитов участка Верхняя Кузема (обр. КУЗ-8) и участка Кив губа (обр. КГ-59) и для Grt-Bt-Amph гнейсов участка Кемь-Луды (обр. КЛ-40, КГ-36-Б). Начальная стадия метаморфизма оценивалась по центрам зональных кристаллов Grt, Cpx и Pl, а параметры пика метаморфизма — по их краевым зонам.

Термобарометрия минеральных ассоциаций проводилась методом TWQ [Berman, 1991; Mader, Berman, 1992; Berman et al., 1995; Berman, Aranovich, 1996; Aranovich, Berman, 1996] с использованием баз взаимно согласованных термодинамических данных (база DEC06 — для гранат-клинопироксеновых и гранат-биотитовых ассоциаций, база B92 — для гранат-амфиболовых). Условия образования безгранатовых амфиболитов ($\text{Amph} + \text{Qtz} + \text{Pl} \pm \text{Cpx}$) приблизительно оценивались по системе TPF [Фонарев и др., 1989]. Результаты расчетов и использованные для расчетов уравнения минеральных реакций приведены в табл. 6 и на рис. 11, а положение всей совокупности оценок P - T для исследованных пород показано на сетке метаморфических фаций (рис. 12). Погрешность оценки температуры составляет $\pm 5\%$, а давления $\pm 10\%$.

Grt-Omp эклогиты и Grt-Aug эклогитоподобные породы. Для определения температуры формирования этих пород использовалась реакция Fe^{2+} -Mg обмена между гранатом и клинопироксеном $\text{Alm} + 3\text{Di} = \text{Prp} + 3\text{Hd}$. Определение давления в гранат-клинопироксеновых ассоциациях, содержащих плаггио-

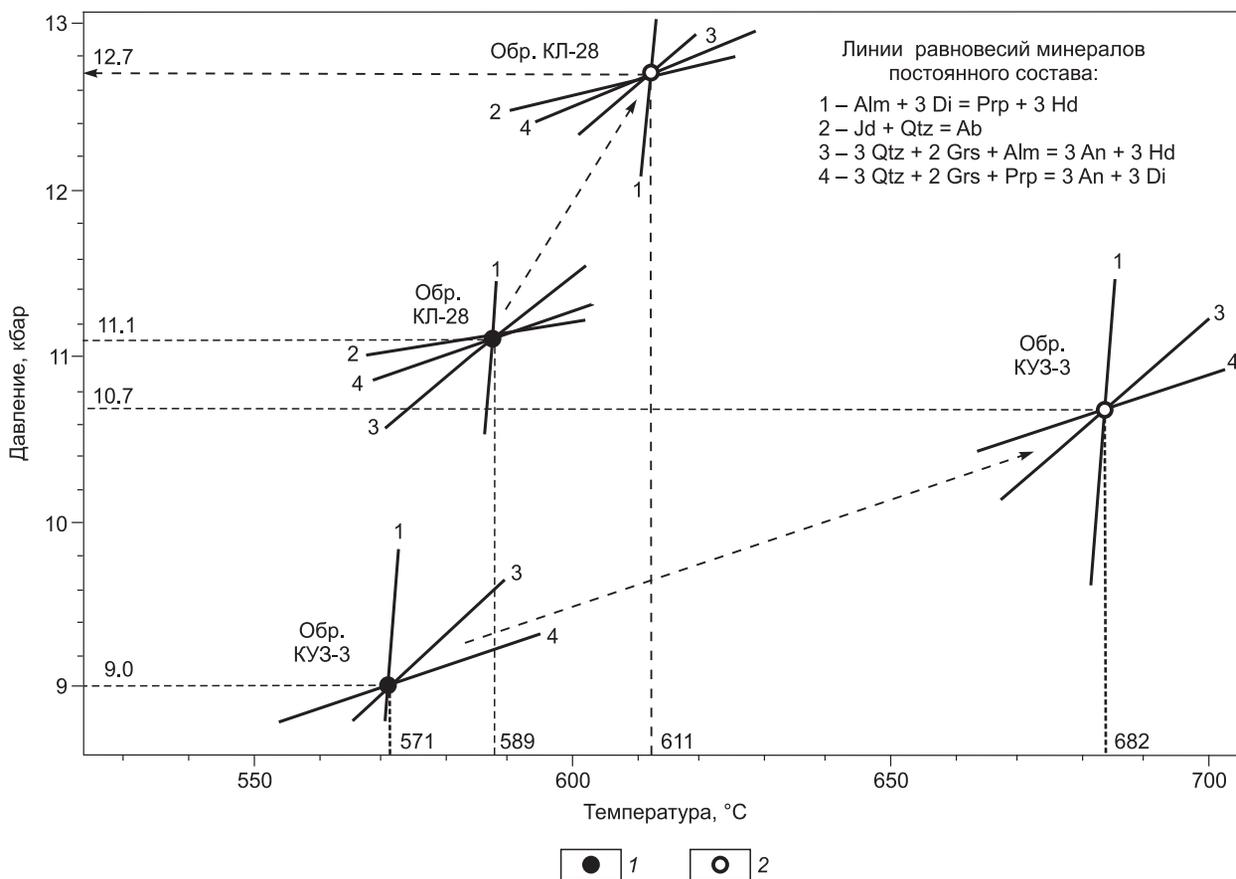


Рис. 11. P - T диаграммы линий постоянного состава минералов изученных образцов Grt-Omp эклогитов (обр. КЛ-28) и Grt-Aug эклогитоподобных пород (обр. КУЗ-3).

Стрелкой показано направление проградно-компрессионной эволюции Grt-Cpx-Pl минеральных ассоциаций. Координаты точек пересечения линий минеральных равновесий соответствуют P - T условиям метаморфизма пород. 1, 2 — центры и края зерен зональных кристаллов.

Таблица 6. Результаты оценки *P-T* условий метаморфизма Grt-Omp эклогитов, Grt-Aug эклогитоподобных пород и вмещающих их пород Беломорского подвижного пояса

Минеральная ассоциация		<i>T</i> , °C	<i>P</i> , кбар	Метод оценки; уравнения минеральных равновесий, используемые для оценки <i>P-T</i> параметров в методе TWQ*
Апоамфиболитовые Grt-Omp эклогиты, участок Кемь-Луды (обр. КЛ-28).	Проградная компрессионная стадия (центры зональных кристаллов)	580—610	10.9—11.8	TWQ; (1)—(4)
	Пиковые параметры метаморфизма (краевые части зональных кристаллов)	600—630	12.5—12.8	»
Апоамфиболитовые Grt-Aug эклогитоподобные породы, участок Верхняя Кузема (обр. КУЗ-3)	Проградная компрессионная стадия (центры зональных кристаллов)	590—610	9.0—9.8	TWQ; (1), (3), (4)
	Пиковые параметры метаморфизма (краевые части зональных кристаллов)	650—700	10.3—11.1	»
Апоамфиболитовые Grt-Aug эклогитоподобные породы, участок Кив губа (обр. КГ-58)	Проградная компрессионная стадия (центры зональных кристаллов)	560—600	9.0—10.0	»
	Пиковые параметры метаморфизма (краевые части зональных кристаллов)	630—670	9.6—10.3	»
Неизмененные амфиболиты, участок Кемь-Луды (обр. КЛ-37)		600—640	7.0—7.5	<i>TPF</i>
Гранат-амфибол-биотитовые гнейсы слабомигматизированные, участок Кемь-Луды (обр. КЛ-40)		400—660	9.5—10.5	TWQ; (5)—(9)
Гранат-амфибол-биотитовые гнейсы, гранат-биотитовый домен, участок Кемь-Луды (обр. КГ-36-б)		670—690	11.6—12.0	»
Неизмененные гранатовые амфиболиты, участок Верхняя Кузема (обр. КУЗ-8)		610—660	7.2—8.2	TWQ; (10)—(15)
Неизмененные гранатовые амфиболиты, участок Кив губа (обр. КГ-59)		560—595	7.8—8.9	»

- * $Alm + 3Di = Prp + 3Hd$ (1),
 $Jd + Qtz = Ab$ (2),
 $3Qtz + 2Grs + Alm = 3An + 3Hd$ (3),
 $3Qtz + 2Grs + Prp = 3An + 3Di$ (4),
 $Alm + Phl = Prp + Ann$ (5),
 $3Eas + 2Alm = 2Prp + 3Sid$ (6),
 $3Sid + 6Qtz + 3Prp + 2Grs = 2Alm + 6An + 3Phl$ (7),
 $3Eas + 6Qtz + Prp + 2Grs = 6An + 3Phl$ (8),
 $3Sid + 6Qtz + 2Grs + Alm = 6An + 3Ann$ (9),
 $3Tr + 5Alm = 5Prp + 3Fe-Tr$ (10),
 $3Prg + 4Alm = 4Prp + 3Fprg$ (11),
 $2Grs + 5Prp + 18Qtz + 3Fprg = 3Tr + 6An + 4Alm + 3Ab$ (12),
 $2Grs + Prp + 18Qtz + 3Prg = 3Tr + 6An + 3Ab$ (13),
 $5Alm + 2Grs + 18Qtz + 3Prg = 3Fe-Tr + 4Prp + 6An + 3Ab$ (14),
 $Alm + 2Grs + 18Qtz + 3Fprg = 3Fe-Tr + 6An + 3Ab$ (15).

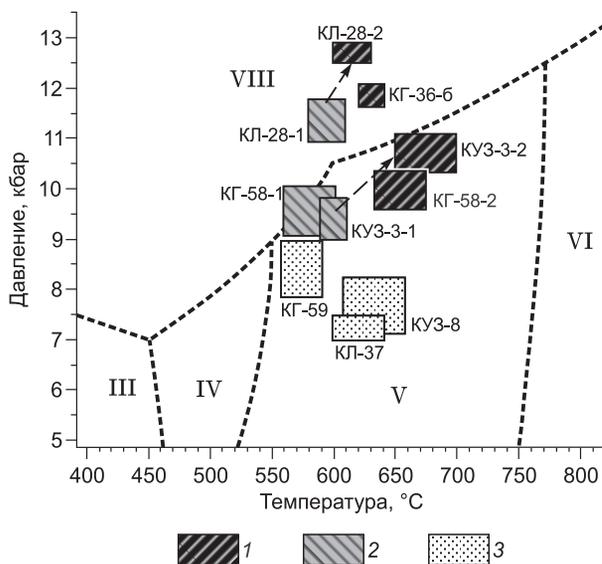
клас, можно проводить по двум реакциям: $Jd + Qtz = Ab$ ⁴; $3Qtz + 2Grs + Alm = 3An + 3Hd$ (или ее аналог $3Qtz + 2Grs + Prp = 3An + 3Di$). Пересечение термо- и барометрических уравнений в одной точке однозначно определяет положение породы в *P-T* поле.

В апоамфиболитовых Grt-Omp эклогитах участка Кемь-Луды (обр. КЛ-28) по краевым частям проградно-зональных гранатов (см. табл. 4, обр. КЛ-28, ан. КЛ-1-28-19) и клинопироксенов (см. табл. 3, обр. КЛ-28, ан. КЛ-1-28-09, КЛ-2-28-20) получено хорошее пересечение линий минеральных равновесий (см. рис. 11). В этих равновесиях участвует достаточно кислый плагиоклас — 17 % An (см. табл. 5,

⁴ Для клинопироксенов с очень низким содержанием жадеита реакция $Jd + Qtz = Ab$ дает слишком большие ошибки, поэтому для оценки *P-T* эклогитоподобных пород она не использовалась.

Рис. 12. Положение апоамфиболитовых Grt-Omp эклогитов, Grt-Aug эклогитоподобных пород и вмещающих их пород на сетке метаморфических фаций, по [Бушмин, Глебовицкий, 2008].

1, 2 — высокобарные Grt-Aug эклогитоподобные породы и Grt-Omp эклогиты: 1 — ассоциации пика метаморфизма по краевым зонам в минералах, 2 — ассоциации начала проградного компрессионного процесса по центральным зонам в минералах; 3 — вмещающие неизменные гнейсы и амфиболиты. Фации метаморфизма: III — зеленосланцевая, IV — эпидот-амфиболитовая, V — амфиболитовая, VI — гранулитовая, VIII — эклогитовая. Стрелкой показано направление проградно-компрессионной эволюции Grt-Cpx-Pl минеральных ассоциаций. КГ-58-1, КУЗ-3-1 и КЛ-28-1 — оценки по центрам зональных кристаллов; КГ-58-2, КУЗ-3-2 и КЛ-28-2 — по краевым зонам.



обр. КЛ-28, ан. КЛ-2-28-71). Из всей совокупности анализов минералов краевых зон получен интервал значений $T = 600\text{—}630\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 12.5\text{—}12.8$ кбар. Эти цифры отражают пиковые значения образования эклогитового парагенезиса в линзах меланократовых амфиболитов.

Для определения начальных параметров, при которых происходило зарождение эклогитовых ассоциаций, были выбраны центральные зоны зерен граната (см. табл. 4, обр. КЛ-28, ан. КЛ-2-28-59) и клинопироксена (см. табл. 3, обр. КЛ-28, ан. КЛ-1-28-03). Учитывая тенденцию уменьшения основности плагиоклаза при переходе от амфиболитов к апоамфиболитовым эклогитам, для оценки параметров зарождения эклогитового парагенезиса был выбран наиболее основной плагиоклаз образца эклогита КЛ-28. Интервал значений P и T для перехода меланократовых амфиболитов в Grt-Omp эклогиты, полученный по плагиоклазу с 22—24 % An (см. рис. 11; табл. 5, обр. КЛ-28, ан. КЛ-2-28-70) и центральным зонам граната и клинопироксена, соответствует $T = 580\text{—}610\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 10.9\text{—}11.8$ кбар.

В отличие от Grt-Omp эклогитов, формирование апоамфиболитовых эклогитоподобных Grt-Aug пород участка Верхняя Кузема (обр. КУЗ-3) сопровождалось увеличением основности плагиоклаза от 34 до 43 % An. Поэтому определение пиковых значений P и T проводилось здесь по краевым зонам проградно-зональных граната (см. табл. 4, обр. КУЗ-3, ан. КУЗ-03-42) и клинопироксена (см. табл. 3, обр. КУЗ-3, ан. КУЗ-3-08), а также редким зернам основного плагиоклаза, прилегающего к соответствующим зонам граната и клинопироксена (см. табл. 5, обр. КУЗ-3, ан. КУЗ-03-43). Для начальной стадии формирования этих пород использованы центры зерен граната (см. табл. 4, обр. КУЗ-3, ан. КУЗ-03-39) и клинопироксена (см. табл. 3, обр. КУЗ-3, ан. КУЗ-3-05) и наиболее кислый плагиоклаз (34 % An) (см. табл. 5, обр. КУЗ-3, ан. КУЗ-03-15), близкий по составу к плагиоклазу вмещающих амфиболитов. Интервал P - T параметров пика метаморфизма составляет $650\text{—}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $10.3\text{—}11.1$ кбар, а начальной стадии — $T = 590\text{—}610\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 9.0\text{—}9.8$ кбар (см. рис. 11).

Для аналогичных Grt-Aug эклогитоподобных пород на участке Кив губа (обр. КГ-58) определены практически такие же параметры метаморфизма по краевым и центральным зонам зональных кристаллов. Интервал P - T параметров пика метаморфизма составляет $630\text{—}670\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $9.6\text{—}10.3$ кбар, а начальной стадии — $T = 560\text{—}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 9.0\text{—}10.0$ кбар.

Сравнивая P - T параметры формирования Grt-Omp эклогитов и Grt-Aug эклогитоподобных пород по трем удаленным друг от друга участкам, можно сказать, что зарождение Grt-Cpx парагенезиса, обозначающего начало перехода меланократовых амфиболитов в Grt-Aug эклогитоподобные породы и в Grt-Omp эклогиты, осуществлялось при весьма близких P - T параметрах ($580 \pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10.5 ± 1.5 кбар). Температура пика метаморфизма Grt-Aug эклогитоподобных пород превышала максимальную температуру образования Grt-Omp эклогитов не более чем на $50\text{—}70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако давление, при котором проходило образование Grt-Omp эклогитов на участке Кемь-Луды, превышало давление образования Grt-Aug эклогитоподобных пород Кузема и Кив губы на $2\text{—}3$ кбар. Возможная природа этих различий приводится в главе «Обсуждение результатов».

Гранат-биотитовые гнейсы (с амфиболом), вмещающие линзы амфиболитов и апоамфиболитовых Grt-Omp эклогитов, представляют собой, как правило, однородные гнейсовидные или полосчатые породы, сложенные незональными минералами. Гнейсы в разной степени мигматизированны. Мигматизация выражается в смене $\text{Amph} + \text{P} + \text{Qtz} \pm (\text{Grt}) \pm (\text{Bt})$ ассоциации на ассоциацию $\text{Grt} + \text{Bt} + \text{Pl} + \text{Kfs} + \text{Qtz}$. При развитии мигматизации гнейсы становятся более лейкократовыми, теряют гнейсовидность и приобретают полосчатую текстуру. Для термобарометрии было выбрано два образца гнейсов. Обр. КЛ-

40 — минимально затронутый мигматизацией (см. табл. 2, 4, 5, ан. КЛ-40-13, КЛ-40-04, КЛ-40-11) и обр. КГ-36 — мигматизированный гнейс, в котором выделяются два домена: КГ-36-а — мезократовый существенно-амфиболовый домен и КГ-36-б — лейкократовый гранат-биотитовый домен (см. табл. 4, 5, ан. КГ-36-6-01, КГ-36-6-05)⁵.

В гнейсах наиболее информативными геотермометрами являются обменные реакции между биотитом и гранатом: $Alm + Phl = Prp + Ann$ и $3Eas + 2Alm = 2Prp + 3Sid$ (реакции (5), (6), см. табл. 6). Линии других минеральных равновесий с участием различных миналов биотита, граната и плагиоклаза (реакции (7)—(9), см. табл. 6) обычно обнаруживают с ними хорошее пересечение. P - T параметры, при которых проходило формирование слабомигматизированных гнейсов КГ-40, соответствуют амфиболитовой фации высокого давления (640—660 °С, 9.5—10.5 кбар). Гранат-биотитовый домен сильномигматизированного гнейса КГ-36-б показал параметры, сопоставимые с параметрами образования эклогитов — $T = 670$ — 690 °С, $P = 11.6$ — 12.0 кбар.

В амфиболитах ($Hbl + Qtz + Pl \pm Vt$), которые непосредственно служат протолитом для эклогитов участка Кемь-Луды, давление оценивалось по барометрам на основе содержания Al в амфиболе [Hammarstrom, Zen, 1986; Hollister et al., 1987], а температура — по Hbl - Pl термометру [Holland, Blundy, 1994], интегрированным в систему TPF . Для неизменных амфиболитов (см. табл. 2, обр. КЛ-37, ан. КЛ-37-24; табл. 5, ан. КЛ-37-28) получен интервал $T = 600$ — 640 °С и $P = 7.0$ — 7.5 кбар.

Параметры формирования *гранатовых амфиболитов* (обр. КУЗ-8), вмещающих метаморфические жилы Grt - Aug эклогитоподобных пород, определялись по пересечению линий обменных Fe - Mg реакций между гранатом и амфиболом: $3Tr + 5Alm = 5Prp + 3Fe-Tr + 3Prg + 4Alm = 4Prp + 3Fprg$ (реакции (10), (11), см. табл. 6) с комплексом барометрических реакций, рекомендованных в [Berman, 1991] (реакции (12)—(15), см. табл. 6). Для неизменных гранатовых амфиболитов (см. табл. 2, обр. КУЗ-8, ан. КУЗ-08-11; табл. 4, ан. КУЗ-08-24) получены значения $T = 610$ — 660 °С и $P = 7.2$ — 8.2 кбар, которые близки к минимальным параметрам, оцененным по безгранатовым амфиболитам участка Кемь-Луды (обр. КЛ-37).

Гранатовые амфиболиты участка Кив губа (обр. КГ-59), вмещающие метаморфогенные прожилки Grt - Aug эклогитоподобных пород (обр. КГ-58), показывают P - T параметры метаморфизма (560—595 °С, 7.8—8.9 кбар), которые также сопоставимы с безгранатовыми амфиболитами (обр. КЛ-37) участка Кемь-Луды и гранатовыми амфиболитами Куземы (обр. КУЗ-8).

На сетке фаций метаморфизма [Бушмин, Глебовицкий, 2008] (см. рис. 12) P - T оценки для Grt - Omp -эклогитов, Grt - Aug -эклогитоподобных пород и вмещающих их амфиболитов и гнейсов образуют три совокупности.

1. Обр. КГ-59, КЛ-37, КУЗ-8 — вмещающие неизменные породы протолита (возможно, архейского или раннепротерозойского возраста) — образуют кучное поле в области амфиболитовой фации умеренного давления.

2. Обр. КГ-58 и КУЗ-3 — умеренно высокобарные Grt - Aug эклогитоподобные породы участков Верхняя Кузема и Кив губа. Эта группа оценок расположена в высокобарной части амфиболитовой фации на границе с эклогитовой.

3. Обр. КЛ-28 и домен КГ-36-б — отвечают собственно Grt - Omp эклогитам участка Кемь-Луды и новообразованной высокобарной ассоциации во вмещающих гнейсах. Эта совокупность оценок находится в низкобарной части эклогитовой фации.

Используя проградную зональность в гранатах и клинопироксенах и изменение состава плагиоклаза, можно реконструировать тренды P - T эволюции при формировании Grt - Cpx - Pl ассоциации Grt - Omp эклогитов и Grt - Aug эклогитоподобных пород внутри совокупностей 2 и 3. Установлено, что эти тренды в исследуемом метаморфическом комплексе включают компрессию и разогрев (стрелки, см. рис. 11, 12), а также субпараллельны границе амфиболитовой и эклогитовой фаций.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные геологические и петрографические исследования указывают на равномерное и широкое присутствие в составе Беломорского подвижного пояса высокобарных Grt - Cpx парагенезисов (Grt - Omp эклогитов с малонатровым омфацитом и эклогитоподобных Grt - Aug пород). Близкие P - T условия пика метаморфизма и одинаковая тенденция в изменении составов породообразующих минералов Grt - Omp эклогитов и эклогитоподобных Grt - Aug пород на разных удаленных участках могут указывать на то, что исследуемые породы сформировались в ходе единого тектонометаморфического цикла и не являются беспорядочной сменой метаморфизмов разных возрастов. Согласно залеганию линз эклогити-

⁵ Биотит из обр. КЛ-40 (ан. КЛ-40-09): $SiO_2 = 35.83$, $TiO_2 = 2.06$, $Al_2O_3 = 17.26$, $FeO = 19.49$, $MnO = 0.28$, $MgO = 10.86$, $Na_2O = 0.18$, $K_2O = 9.40$; биотит из гранат-биотитового домена обр. КГ-36 (ан. КГ-36-6-08): $SiO_2 = 34.84$, $TiO_2 = 2.31$, $Al_2O_3 = 17.06$, $FeO = 20.76$, $MnO = 0.40$, $MgO = 9.46$, $Na_2O = 0.00$, $K_2O = 9.71$ (мас. %).

зированных меланократовых амфиболитов в гнейсах, не нарушенное тектоническими процессами, проградные преобразования в самих гнейсах и изофаціальность гнейсов, эклогитов и эклогитоподобных пород указывают на то, что TTG гнейсы, амфиболиты, Grt-Omp эклогиты и Grt-Aug эклогитоподобные породы составляют единый неоднородный сложнопостроенный проградно эволюционировавший метаморфический комплекс.

Весьма показательным в этом отношении оказалось определение давления образования эклогитов и эклогитоподобных пород, которое по самым лояльным оценкам не превышает 12.8 кбар и соответствует низкобарической эклогитовой фации [Бушмин, Глебовицкий, 2008] (см. рис. 12), достижимой на уровне нижней коры. Любопытно, что кислые породы (TTG гнейсы) ни в составе эклогитосодержащего комплекса, ни за его пределами, где они окружают дисконформные эклогитизированные дайки базитов, не содержат каких-либо индикаторов давлений, превышающих 12.5—13.0 кбар. При $P \geq 13$ кбар такими индикаторами являются Grt-Phn или Grt-Kfs реакционные каймы между Vt и Pl, обнаруживаемые в гнейсах из многих эклогитовых комплексов мира [Кориковский, 2012]. Но ничего подобного в кислых породах Беломорского пояса нет, и это указывает на то, что при метаморфизме в условиях низкобарической эклогитовой фации давление не поднималось выше ≥ 13 кбар.

Многочисленные эклогитизированные дайки Fe-метагаббро и метагабброноритов, исследованные в районе Красной губы [Козловский, Аранович, 2008, 2010] и о. Большой Кемь-Лудский, также изофаціальны с вмещающей гнейсовой толщей и показывают сходные параметры метаморфизма: $T = 700 \pm 40$ °C и $P = 10.0 \pm 0.5$ кбар. Однако в дайках Fe метагаббро нигде не отмечено проградной зональности порообразующих минералов. При этом широко развиты декомпрессионные постэклогитовые симплектитовые структуры. Геологические соотношения показывают конформность даек и складчатых структур в гнейсах и секущее положение даек и линз эклогитизированных амфиболитов. Это позволяет предполагать, что внедрение даек Fe метагаббро проходило синхронно с деформациями на пике метаморфизма.

Grt-Cpx высокобарные минеральные ассоциации на участке Кемь-Луды сформировались при давлении на 2—3 кбара выше, чем аналогичные Grt-Cpx высокобарные ассоциации на участках Верхняя Кузема и Кив губа (см. рис. 12). Это различие может быть следствием расположения исследуемых объектов в разных геологических блоках внутри Беломорского подвижного пояса. Кемь-Лудский островной участок расположен в всячем (поднятом) крыле крупного надвига, а Кивгубский и Куземский материковые участки — в лежачем (опущенном) крыле. Следовательно, в постэклогитовый (вероятно, поздне-свекофенский) период активизации БПП более глубокий Кемь-Лудский островной блок и относительно менее глубокий материковый блок были выведены на один структурный уровень.

Геологические соотношения высокобарных Grt-Cpx пород с вмещающими гнейсами и с амфиболитами протолита, а также жильная или микропрожилковая морфология выделения Grt-Cpx-Pl ассоциации в амфиболитах указывают на высокую роль потоков флюидов в образовании Grt-Omp эклогитов и эклогитоподобных Grt-Aug пород. Умеренное давление при метаморфизме [Кориковский и др., 1997] и локализованность Grt-Cpx-Pl парагенезисов в местах сосредоточения потоков метаморфических флюидов являются одной из причин того, что среди метабазитов БПП наряду с эклогитами в изобилии сохраняются обычные амфиболиты и Grt-Aug-содержащие меланократовые амфиболиты без омфацита. Различная температура образования апоамфиболитовых высокобарных Grt-Cpx парагенезисов в Кивгубском, Куземском и Кемь-Лудском сегментах БПП может быть связана с локальными вариациями температурного поля в зависимости от удаленности от крупных интрузивных тел и/или от температуры фильтрующихся метаморфических флюидов.

Разнообразие Grt-Cpx высокобарных минеральных ассоциаций (ВБМА) в БПП связано, прежде всего, с неоднородностью состава амфиболитового протолита, по которому формировались ВБМА (преимущественно в отношении содержания CaO (см. рис. 3, а). Но также возможно, что не последнюю роль в формировании разнообразия Grt-Cpx пород играло переменное соотношение активностей a_{CaO}/a_{Na_2O} в фильтрующемся метаморфическом флюиде. Grt-Omp эклогиты развивались преимущественно по амфиболитам, залегающим в виде линз в гнейсах. Эти низкокальциевые амфиболиты (см. табл. 1, рис. 3, а) содержат исходный относительно кислый плагиоклаз ($An = 25—30$ мол. %), который в процессе эклогитизации становился еще более кислым — $An = 17—23$ мол. %. Следовательно, флюид, фильтрующийся через гнейсы (также содержащие кислый плагиоклаз), обладал высокой активностью Na_2O и низким отношением a_{CaO}/a_{Na_2O} . Такой флюид инициировал не только понижение основности плагиоклаза, но и привел на ранней стадии к формированию Na-Al-амфибола — эденита, а на поздней — Na-Al клинопироксена (омфацита).

Эклогитоподобные Grt-Aug породы развивались преимущественно по мощным мафическим зонам, сложенным относительно высококальциевыми амфиболитами (см. табл. 1, рис. 3, а), содержащими более основной плагиоклаз, $An = 34—40$ мол. %. В отличие от эклогитов, формирование Grt-Aug ассоциации в этих породах сопровождалось повышением основности плагиоклаза с $An = 34$ до 49 мол. %, а

иногда и до 59—61 мол. %. Следовательно, флюид, фильтрующийся через амфиболиты, обладал пониженной активностью Na_2O и повышенной CaO . Этим, по-видимому, объясняется отсутствие в Grt-Aug эклогитоподобных породах типичного омфациита. Сочетание повышенной активности CaO с высокой активностью CO_2 объясняет наличие кальцита в эклогитоподобных породах, тогда как в собственно эклогитах, характеризующихся низкой активностью CaO , карбонат отсутствует.

Изложенные выше особенности Grt-Omp эклогитов и Grt-Aug эклогитоподобных пород и их первичные геологические соотношения с вмещающими метаморфическими толщами, очевидно, не связанные с процессами образования тектонического меланжа, не учитываются ни одной из известных моделей формирования эклогитов в БПП.

ВЫВОДЫ

1. Grt-Omp эклогиты и Grt-Aug эклогитоподобные породы распространены в пределах Беломорского подвижного пояса на весьма большой площади. Находки этих пород генетически не связаны с зонами тектонического меланжа. Протолитом для Grt-Omp эклогитов и Grt-Aug эклогитоподобных пород служат древние (архейские или раннепротерозойские?) амфиболиты Беломорского подвижного пояса. Grt-Omp эклогиты образуют микропрожилки в субстратиформных линзах амфиболитов, залегающих в толще гнейсов. Эклогитоподобные Grt-Aug породы формируют как микропрожилки, так и согласные с полосчатостью метаморфические жилы в мощных и протяженных зонах развития амфиболитов. Морфология тел Grt-Omp эклогитов и Grt-Aug эклогитоподобных пород отражает пути фильтрации метаморфических флюидов. Амфиболиты протолита связаны с Grt-Omp эклогитами и Grt-Aug эклогитоподобными породами промежуточной петрографической разновидностью — меланократовыми амфиболитами.

2. Grt-Cpx высокобарные породы, амфиболиты, гнейсы, а также и дайки метабазитов представляют собой сложнопостроенный комплекс, сформированный в результате одного крупного цикла проградного метаморфизма. Параметры пика образования Grt-Omp эклогитов в прибрежном и островном восточном секторе БПП (на участке Кемь-Луды) отвечают низкобарической области эклогитовой фации (12.5—13.0 кбар, 600—630 °C), а пик метаморфизма для Grt-Aug эклогитоподобных пород в западном материковом секторе соответствовал границе амфиболитовой и эклогитовой фаций — $P = 9.6\text{—}11.1$ кбар, $T = 630\text{—}700$ °C. Различие по давлению может быть связано с тектоническим совмещением метаморфических образований разного уровня глубинности.

3. Разнообразие парагенезисов апоамфиболитовых Grt-Cpx высокобарных пород может быть обусловлено как вариациями валового состава амфиболитового протолита, так и разным отношением активностей $a\text{CaO}/a\text{Na}_2\text{O}$ во флюиде. Низкое валовое содержание CaO в протолите (и/или низкое отношение $a\text{CaO}/a\text{Na}_2\text{O}$ во флюиде) приводит на ранней стадии к формированию меланократовых амфиболитов с высокоглиноземистым Na-Al амфиболом паргасит-эденитового состава, а на поздней — к образованию собственно Grt-Omp эклогитов. Высокое валовое содержание CaO в протолите (и/или высокое отношение $a\text{CaO}/a\text{Na}_2\text{O}$ во флюиде) инициирует на ранней стадии формирование меланократовых амфиболитов с высокоглиноземистым, но относительно низко-Na амфиболом — Mg-роговой обманкой или чермакитом. На поздней стадии формируются Grt-Aug эклогитоподобные породы, содержащие безжадеитовый клинопироксен.

Авторы выражают благодарность В.О. Япаскурту, Л.И. Марущенко, Е.В. Гусевой за микророндовые анализы и электронные фотографии, сотрудникам Кандалакшского государственного заповедника за помощь в организации работ на о. Большой Кемь-Лудский.

Работа выполнена при поддержке ОНЗ РАН (программы № 6, 9) и РФФИ (гранты 13-05-00339-а, 12-05-00303-а, 12-05-00860-а).

ЛИТЕРАТУРА

Березин А.В., Травин В.В., Марин Ю.Б., Скублов С.Г., Богомолов Е.С. Новые данные о возрасте (U-Pb, Sm-Nd) и P - T -параметрах эклогитизации даек Fe-габбро района Гридино (Беломорский подвижный пояс) // ДАН, 2012, т. 444, № 6, с. 644—649.

Бушмин С.А., Глебовицкий В.А. Схема минеральных фаций метаморфических пород // Зап. РМО, 2008, ч. СXXXVII, № 2, с. 1—13.

Володичев О.И., Кузенко Т.И. Структуры распада в пироксенах эклогитизированных габброидов как индикаторы эволюции магматических и метаморфических процессов (с. Гридино, Северная Карелия) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 13. Петрозаводск, Изд-во КарНЦ РАН, 2010, с. 56—65.

Володичев О.И., Кузенко Т.И. Древнейшие на Земле эклогиты — проградные и ретроградные тренды эволюции, геодинамическая интерпретация (Карелия, район с. Гридино) // Современные пробле-

мы магматизма и метаморфизма. Материалы Всероссийской конференции к 150-летию Ф.Ю. Левинсон-Лессинга и 100-летию Г.М. Саранчиной. Т. 1. СПб., 2012, с. 134—138.

Володичев О.И., Слабунов А.И., Бибикина Е.В., Конилов А.Н., Кузенко Т.И. Архейские эклогиты Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит) // Петрология, 2004, т. 12, № 6, с. 609—631.

Володичев О.И., Парфенова О.В., Кузенко Т.И. Палеопротерозойские эклогиты Беломорского подвижного пояса (об эклогитизации габбро в дайке комплекса лерцолитов-габброноритов) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 11. Петрозаводск, Изд-во КарНЦ РАН, 2008, с. 37—61.

Володичев О.И., Слабунов А.И., Степанова А.В., Степанов В.С., Сибилев О.С. Архейские и палеопротерозойские эклогиты района с. Гридино // Гранулитовые и эклогитовые комплексы в истории Земли. Путеводитель научных экскурсий. Петрозаводск, Изд-во КарНЦ РАН, 2011, с. 21—37.

Докукина К.А., Каулина Т.В., Конилов А.Н. Датирование реперных событий в истории докембрийских сложнодислоцированных комплексов (на примере Беломорской эклогитовой провинции) // ДАН, 2009, т. 425, № 1, с. 83—88.

Докукина К.А., Баянова Т.Б., Каулина Т.В., Травин А.В., Конилов А.Н. Новые геохронологические данные для метаморфических и магматических пород района с. Гридино (Беломорская эклогитовая провинция) // ДАН, 2010, т. 432, № 3, с. 370—375.

Докукина К.А., Баянова Т.Б., Каулина Т.В., Травин А.В., Минц М.В., Конилов А.Н., Серов П.А. Беломорская эклогитовая провинция: последовательность событий и возраст формирования магматических и метаморфических пород ассоциации Гридино // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (10), с. 1335—1373.

Каулина Т.В., Япаскурт В.О., Пресняков С.А., Савченко Е.С., Симакин С.Г. Метаморфическая эволюция архейских эклогитоподобных пород района Широкой и Узкой Салмы (Кольский п-ов): геохимические особенности цирконов, состав включений и возраст // Геохимия, 2010, № 9, с. 926—945.

Козловский В.М. Новые находки высокобарных пород в Беломорском подвижном поясе // ДАН, 2010, т. 434, № 3, с. 382—387.

Козловский В.М. Высокобарные парагенезисы в породах раннего докембрия Беломорского подвижного пояса. Петрологическая и геодинамическая интерпретация новых находок // Проблемы плейт- и плюм-тектоники в докембрии. Материалы III Всероссийской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия. СПб., Изд-во ИГГД РАН, 2011а, с. 82—84.

Козловский В.М. Структурно-вещественные геологические комплексы, слагающие острова Кемь-Лудского архипелага и прибрежную материковую зону // Летопись природы Кандалакшского заповедника за 2010 г. Кн. 56, Т. 1. Кандалакша, Изд-во Кандалакшского заповедника, 2011б, с. 21—39.

Козловский В.М., Аранович Л.Я. Геолого-структурные условия эклогитизации палеопротерозойских базитовых даек восточной части Беломорского подвижного пояса // Геотектоника, 2008, № 4, с. 70—84.

Козловский В.М., Аранович Л.Я. Петрология и термобарометрия эклогитовых пород Красногубского дайкового поля, Беломорский подвижный пояс // Петрология, 2010, т. 18, № 1, с. 29—52.

Козловский В.М., Вирюс А.А. Автохтонные гранитоидные выплавки во флюидонасыщенных зонах деформаций Беломорского подвижного пояса // ДАН, 2011, т. 437, № 6, с. 798—802.

Колодяжный С.Ю. Структурно-кинематическая эволюция юго-восточной части Балтийского щита в палеопротерозое. М., ГЕОС, 2006, 332 с. (Тр. ГИН РАН, вып. 572).

Конилов А.Н., Докукина К.А. Петрология базитовых даек гридинского дайкового поля (Северная Карелия, Беломорская эклогитовая провинция) // Бюл. МОИП. Отд. геол., 2011, т. 86, вып. 4, с. 51—78.

Кориковский С.П. Фации метаморфизма коровых эклогитов // Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков. Материалы Всероссийской конференции, посвященной 10-летию РФФИ. Т. 2. М., 2002, с. 108—110.

Кориковский С.П. Проградные преобразования габбро-норитов при эклогитизации в температурном интервале 600—700 °С // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (12), с. 1352—1366.

Кориковский С.П. Метаморфические преобразования метапелитов, гнейсов и гранитоидов в условиях эклогитовой фации // Современные проблемы магматизма и метаморфизма. Материалы Всероссийской конференции к 150-летию Ф.Ю. Левинсон-Лессинга и 100-летию Г.М. Саранчиной. Т. 1. СПб., 2012, с. 291—294.

Кориковский С.П., Мирчовский В., Закриадзе Г.С. Метаморфическая эволюция и состав протолита плагиоклазсодержащих эклогит-амфиболитов Бучимского блока Сербско-Македонского массива, Македония // Петрология, 1997, т. 5, № 6, с. 596—613.

Минц М.В., Конилов А.Н., Докукина К.А., Каулина Т.В., Белоусова Е.А., Натапов Л.М., Гриффин У.Л., О'Рейли С. Беломорская эклогитовая провинция: уникальные свидетельства мезонеоархейской коллизии // ДАН, 2010, т. 434, № 6, с. 776—781.

Скублов С.Г., Астафьев Б.Ю., Марин Ю.Б., Березин А.В., Мельник А.Е., Пресняков С.Л. Новые данные о возрасте эклогитов Беломорского подвижного пояса с. Гридино // ДАН, 2011а, т. 439, № 6, с. 795—802.

Скублов С.Г., Березин А.В., Мельник А.Е. Палеопротерозойские эклогиты северо-западной части Беломорского подвижного пояса, район Салмы: состав и изотопно-геохимическая характеристика минералов, возраст метаморфизма // Петрология, 2011б, т. 19, № 5, с. 493—519.

Скублов С.Г., Березин А.В., Бережная Н.Г. Общие закономерности состава цирконов из эклогитов по редким элементам применительно к проблеме возраста эклогитов Беломорского подвижного пояса // Петрология, 2012, т. 20, № 5, с. 470—494.

Слабунов А.И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск, Изд-во КарНЦ РАН, 2008, 296 с.

Степанов В.С., Степанова А.В. Ранние палеопротерозойские метагаббро района с. Гридино (Беломорский подвижный пояс) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. Петрозаводск, Изд-во КарНЦ РАН, 2006, с. 55—71.

Степанов В.С., Степанова А.В. Геологический аспект условий формирования раннепротерозойских даек гранат-клинопироксеновых габброидов Воротной Луды, западное побережье Белого моря // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 12. Петрозаводск, Изд-во КарНЦ РАН, 2009, с. 100—111.

Травин В.В., Козлова Н.Е. Локальные сдвиговые деформации как причина эклогитизации (на примере структур Гридинской зоны меланжа, Беломорский подвижный пояс // ДАН, 2005, т. 405, № 3, с. 376—380.

Фонарев В.И., Графчиков А.А., Конилов А.Н. Система согласованных минералогических термометров для метаморфических комплексов // Физико-химический анализ процессов минералообразования. М., Наука, 1989, с. 96—126.

Херварц Д., Скублов С.Г., Березин А.В., Мельник А.Е. Первые определения Lu-Hf-возраста гранатов из эклогитов Беломорского подвижного пояса (Балтийский щит, Россия) // ДАН, 2012, т. 443, № 2, с. 221—224.

Щипанский А.А., Ходоревская Л.И., Конилов А.Н., Слабунов А.И. Эклогиты Беломорского пояса (Кольский полуостров): геология и петрология // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (1), с. 3—29.

Aranovich L.Ya., Berman R.G. Optimized standard state and solution properties of minerals: II. Comparisons, predictions, and applications // Contr. Miner. Petrol., 1996, v. 126, p. 25—37.

Berman R.G. Thermobarometry using multi-equilibrium calculations: a new technique with petrologic applications // Canad. Miner., 1991, v. 29, p. 833—855.

Berman R.G., Aranovich L.Ya. Optimized standard state and solution properties of minerals: I. Model calibration for olivine, orthopyroxene, cordierite, garnet, and ilmenite in the system FeO—MgO—CaO—Al₂O₃—TiO₂—SiO₂ // Contr. Miner. Petrol., 1996, v. 126, p. 1—24.

Berman R.G., Aranovich L.Y., Pattison D.R.M. Reassessment of the Garnet-Clinopyroxene Fe-Mg exchange thermometer: II. Thermodynamic analysis // Contr. Miner. Petrol., 1995, v. 119, p. 30—42.

Cawthorn R.G., Collerson K.D. The recalculation of pyroxene end-member parameters and the estimation of ferrous and ferric iron content from electron microprobe analyses // Amer. Miner., 1974, v. 59, p. 1203—1208.

Essene E.J., Fyfe W.S. Omphacite in Californian metamorphic rocks // Contr. Miner. Petrol., 1967, v. 15, p. 1—23.

Hammarstrom J.M., Zen E-an. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer // Amer. Miner., 1986, v. 71, p. 1297—1313.

Hawthorne A.C., Oberti R., Harlow G.E., Maresch W.V., Martin R.F., Schumacher J.C., Welch V.D. IMA Report. Nomenclature of the amphibole supergroup // Amer. Miner., 2012, v. 97, p. 2031—2048.

Holland T., Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry // Contr. Miner. Petrol., 1994, v. 116, p. 433—447.

Hollister L.S., Grissom G.C., Peters E.K., Stowell H.H., Sisson V.B. Conformation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons // Amer. Miner., 1987, v. 72, p. 231—239.

Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Maresch W.V., Nickel E.N., Rock N.M.S. Nomenclature of amphiboles. Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names // Eur. J. Miner., 1997, v. 9, p. 623—642.

Mader Urs. K., Berman R.G. Amphibole thermobarometry: a thermodynamic approach // Geol. Surv. Canada, Current Research, 1992, part E. 92-1E, p. 393—400.

Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K., Ginzburg I.V., Ross M., Seifert F.A., Zussman J., Aoki K., Gottardi J. Nomenclature of pyroxenes // Amer. Miner., 1988, v. 73, p. 1123—1133.

Schumacher J.C. The estimation of ferric iron in electron microprobe analysis of amphiboles // Eur. J. Miner., 1997, v. 9, p. 643—651.

Travin V.V., Kozlova N.E. Eclogitizations of Basites in Early Proterozoic Shear Zones in the Area of the Village of Gridino, Western Belomorie // Petrology, 2009, v. 17, № 7, p. 684—706.

Рекомендована к печати 5 марта 2014 г.

В.В. Ревердатто

Поступила в редакцию

15 октября 2013 г.