

УДК 552:552.163:552.18:552.4 (470.22)

МЕТАМОРФИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ПОНЬГОМНАВОЛОКСКОГО ГРАНУЛИТ-ЭНДЕРБИТ-ЧАРНОКИТОВОГО КОМПЛЕКСА БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА

Н. Е. Король

Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

Рассмотрены и впервые выделены и обобщены геолого-петрологические и минералогические особенности полиэтапной метаморфической эволюции пород Поньгомнаволоцкого гранулит-эндербит-чарнокитового (ГЭЧ) комплекса Беломорского подвижного пояса. В состав ГЭЧ-комплекса входят два интрузивных массива, внедрение которых произошло в РТ-условиях гранулитовой фации метаморфизма. Досконально исследован первый Поньгомнаволоцкий массив эндербитов – чарнокитоидов (2728 Ma) с ксенолитами и реликтовыми участками основных гранулитов – двупироксен-плаггиоклазовых и двупироксен-амфиболовых кристаллических сланцев. Выделяются два гранулитовых этапа с последующим этапом диафтореза. Исследованы, установлены и проанализированы последовательность, типы и характер метаморфических и метасоматических процессов, РТ-параметры (Т_{РФ}, Т_{WQ}), характеризующие становление и преобразование парагенезисов основных гранулитов и эндербитов – чарнокитоидов в условиях гранулитовой фации метаморфизма на I и их позднюю изофациальную перекристаллизацию на II этапе метаморфической эволюции ГЭЧ-комплекса. Детальное изучение габброидов – габбро-диоритов – двупироксеновых кварцевых диоритов – гранодиоритов второго Поньгомнаволоцкого массива показало, что данные образования отличаются от одноименных средних-кислых пород первого массива по геологическим, петрологическим и геохронологическим (2416 Ma) данным, а также существованием одного гранулитового этапа в метаморфической эволюции. В изученных разновидностях пород этого массива не обнаружены проявления процессов изофациального реметаморфизма, характеризующего второй этап, но зафиксированы последующие диафторические изменения, проявленные достаточно интенсивно. На данной стадии исследований очевидно, что принадлежность обоих массивов к единому ГЭЧ-комплексу требует дополнительного изучения, осмысления и обоснования.

Ключевые слова: метаморфизм; гранулитовая фация; парагенезис; термометрия; диафторез.

N. E. Korol. METAMORPHIC EVOLUTION OF THE PONGOMNAVOLOK GRANULITE-ENDERBITE-CHARNOCKITE COMPLEX, BELOMORIAN MOBILE BELT

The geological, petrological and mineralogical characteristics of the multi-stage metamorphic evolution of rocks in the Pongomnavolok granulite-enderbite-charnockite (GEC) complex of the Belomorian mobile belt are discussed and the first attempt to identify and generalize them is made. The GEC complex consists of two intrusive massifs,

which intruded under granulite-facies PT-conditions. The first (2728 Ma) Pongomnavolok enderbite-charnockitoid massif with xenoliths and relict mafic granulite – bipyroxene-amphibole crystalline schist units was studied in detail. Two granulite stages, followed by a diaphthoresis stage, are distinguished. The sequence, types and patterns of metamorphic and metasomatic processes and PT-parameters (TPF, TWQ) characterizing the formation and transformation of the parageneses of mafic granulites and enderbite-charnockitoids under granulite-facies conditions at stage I and their late isofacies recrystallization at stage II of the metamorphic evolution of the GEC complex were studied and analyzed. The detailed study of gabbroids-gabbro-diorites-bipyroxene quartz diorites-granodiorites from the second Pongomnavolok massif showed that they differ from the homonymous intermediate-felsic rocks of massif I in that there is one granulite stage in their metamorphic evolution, as shown by geological, petrological and geochronological (2416 Ma) data. The rock varieties of this massif displayed no signs of isofacies remetamorphism characteristic of stage II, but more recent intensive diaphthoretic alterations have been revealed. At this stage of the study, it is obvious that further investigation, re-thinking and substantiation are needed to prove that both massifs belong to the same GEC complex.

Key words: metamorphism; granulite facies; paragenesis; thermobarometry; diaphthoresis.

Введение

Архейские гранулит-эндербит-чарнокитовые (ГЭЧ) комплексы: Нотозерский (оз. Нотозеро – оз. Ковдозеро), Керчугский (оз. Керчуг), Вичанский (п-ова Вичаны и Мундиннаволоок оз. Кереть) и Поньгомнаволоокский (п-ов Поньгомнаволоок губы Поньгомы Белого моря) расположены (рис. 1) в пределах Западно-Беломорского (ЗБД) и Восточно-Беломорского (ВБД) доменов Беломорского подвижного пояса (БПП). Поньгомнаволоокский ГЭЧ-комплекс находится практически на границе зоны сочленения обоих доменов. Установлено, что ЗБД и ВБД различаются геодинамическими обстановками и типами P-T-t трендов [Volodichev, 2014]. Спецификой metamorphic эволюции ГЭЧ-комплексов является умереннобарический гранулитовый метаморфизм с последующим, наложенным, высокобарическим – кианитовой (амфиболитовой) фации, связанным с широко проявленным коллизионным этапом развития БПП.

Район губы Поньгомы Белого моря (рис. 1) сложен глубокометаморфизованными беломорскими образованиями – различными амфиболитами и гнейсами, эклогитоподобными (Grt-Cpx-Pl)¹ породами, испытавшими интенсивные процессы мигматизации и метасоматоза. Здесь О. И. Володичевым [1975] впервые

для БПП была выделена фация дупироксеновых гнейсов (гранулитовая) умеренных давлений в качестве наиболее раннего (домигматитового) периода metamorphic эволюции беломорских образований.

Полуостров Поньгомнаволоок расположен в южной части губы Поньгомы Белого моря и известен в своей геологической истории развитием гиперстенсодержащих пород. Впервые о присутствии здесь массива гиперстеновых диоритов сообщил Н. Г. Судовиков [1937], эти породы изучались К. А. Шуркиным [1964], В. С. Степановым и А. И. Слабуновым [1994], Т. Ф. Зингер с коллегами [Zinger et al., 1996] и другими. На территории полуострова всеми исследователями выделяются два разновозрастных интрузивных массива – ранний и более поздний (рис. 2).

Первый интрузивный массив сложен эндербитами: ортопироксеновыми ± дупироксеновыми диоритами – кварцевыми диоритами нормального и субщелочного ряда – тоналитами-плагиогранитами – чарнокитоидами известково-щелочной серии (табл. 1). Среди последних разновидностей пород распространены преимущественно чарнокиты (ортопироксеновые граниты), редко чарноэндербиты (дупироксеновые гранодиориты), очень редко щелочнополевошпатовые чарнокиты (дупи-

¹ Символы минералов по Kretz [1983] с добавлениями: Ab – альбит, Ac – акмит, Amp – амфибол, An – анортит, And – андалузит, Aug – авгит, Anz – андезин, Bt – биотит, Ca-Ts – молекула чермака, Cpx – моноклинный пироксен, Di – диопсид, Ed – эденит, Ep – энстатит, Fe-Ed – ферроэденит, Fe-Prg – ферропаргасит, Fe-Ts – феррочермакит, Fs – ферросилит, Grt – гранат, Hbl – обыкновенная роговая обманка, Hd – ге-

денбергит, Hs – гастингсит, Jd – жадеит, Kfs – калиевый полевой шпат, Ky – кианит, Lbr – лабрадор, Mag – магнетит, Mg-Hs – магнезиогастингсит, Mg-Sdg – магнезиосаданагаит, Olg – олигоклаз, Орх – ромбический пироксен, Or – ортоклаз, Pgt – пижонит, Pl – плагиоклаз, Prg – паргасит, Px – пироксен, Qtz – кварц, Sdg – саданагаит, Sil – силлиманит, Ti-Mag – титаномагнетит, Ts – чермакит, Wo – волластонит.

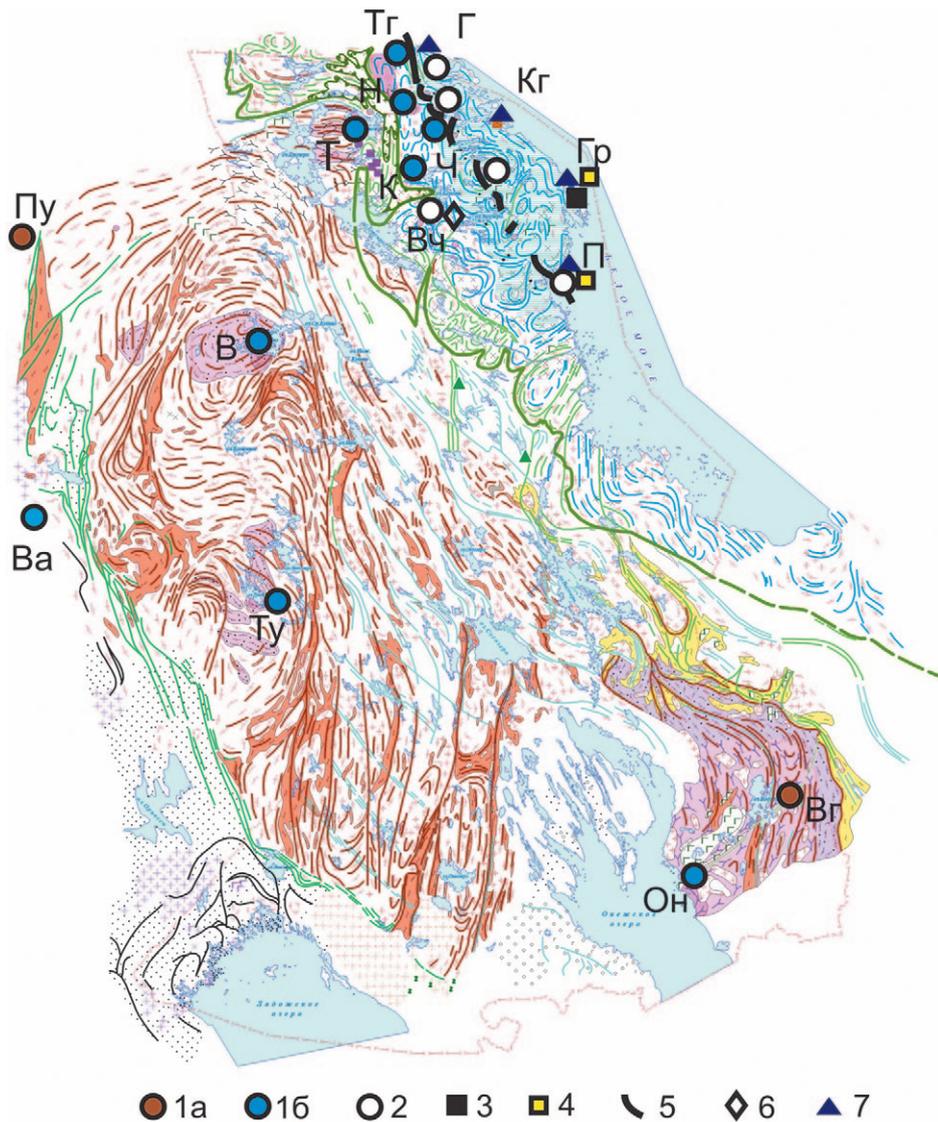


Рис. 1. Гранулитовые и эклогитовые комплексы Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса на «Карте метаморфизма и транспрессиональной тектоники докембрия Карелии и сопредельных территорий», м-ба 1:1000000, составленной О. И. Володичевым в 2001 году [Володичев и др., 2011]:

1–6 – архейские: 1–4 – доколлизийные: 1 – ареального типа (1а – 3,15–3,10 млрд лет, Пудасъярвинский (Пу) и Выг (Вг) комплексы, 16 – 2,78–2,63 млрд лет, Варпайсъярви (Ва), Вокнаволок (В), Тулос (Ту), Онежский (Он), Тикшозеро (Т), Нотозеро (Н), Тупая губа (Тр), Керчуг (К), Чупа (Ч)); 2 – в супракрустальных немигматизированных породах (метавулканисты Вичан – (Вч), «сухие» чупинские гранат-биотитовые гнейсы (Ч), Поньгома (П), включая Поньгомнаволок, и др.); 3 – эклогиты Гридино (Гр); 4 – эндербиты в зонах меланжа (Поньгома, Гридино); 5–6 – периода архейской коллизии: 5 – кyanит-ортоклазовая фация (Поньгома, Тупая губа); 6 – кyanит-гиперстеновая фация (Вичаны). 7 – палеопротерозойские эклогиты по дайкам (Гридино, Красная губа (Кг), Горелый (Г), губа Поньгома)

Fig. 1. Granulite and eclogite complexes of the Karelian Craton and the Belomorian mobile belt on the "Map of Precambrian metamorphism and transpression tectonics in Karelia and adjacent territories" (1:1000 000 scale) compiled by O. I. Volodichev in 2001 [Volodichev et al., 2011]:

1–6 – Archean: 1–4 – pre-collisional: 1 – areal-type: 1a – 3.15–3.10 Ga, Pudasjarvi (Пу) and Vyg (Вг) complexes; 16 – 2.78–2.63 Ga, Varpaisjarvi (Ва), Voknavolok (В), Tulos (Ту), Onega (Он), Tikshozero (Т), Notozero (Н), Tupaya Guba (Тр), Kerchug (К), Chupa (Ч); 2 – in supracrustal non-migmatized rocks (Vichany metavolcanics – (Вч), «dry» Chupa garnet-biotite gneisses (Ч), Pongoma (П), including Pongomnavolok, etc.); 3 – Gridino eclogites (Гр); 4 – enderbites in mélangé zones (Pongoma, Gridino); 5–6 – Archean collision period: 5 – kyanite-orthoclase facies (Pongoma, Tupaya Guba); 6 – kyanite-hypersthene facies (Vichany); 7 – Paleoproterozoic eclogites after dykes (Gridino, Krasnaya Guba (Кг), Gorely (Г), Guba Pongoma).

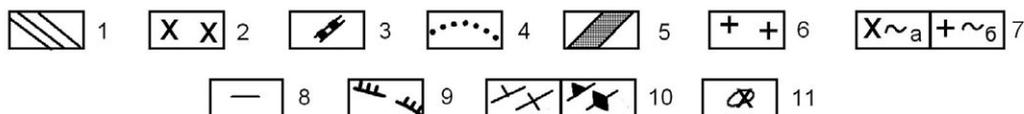
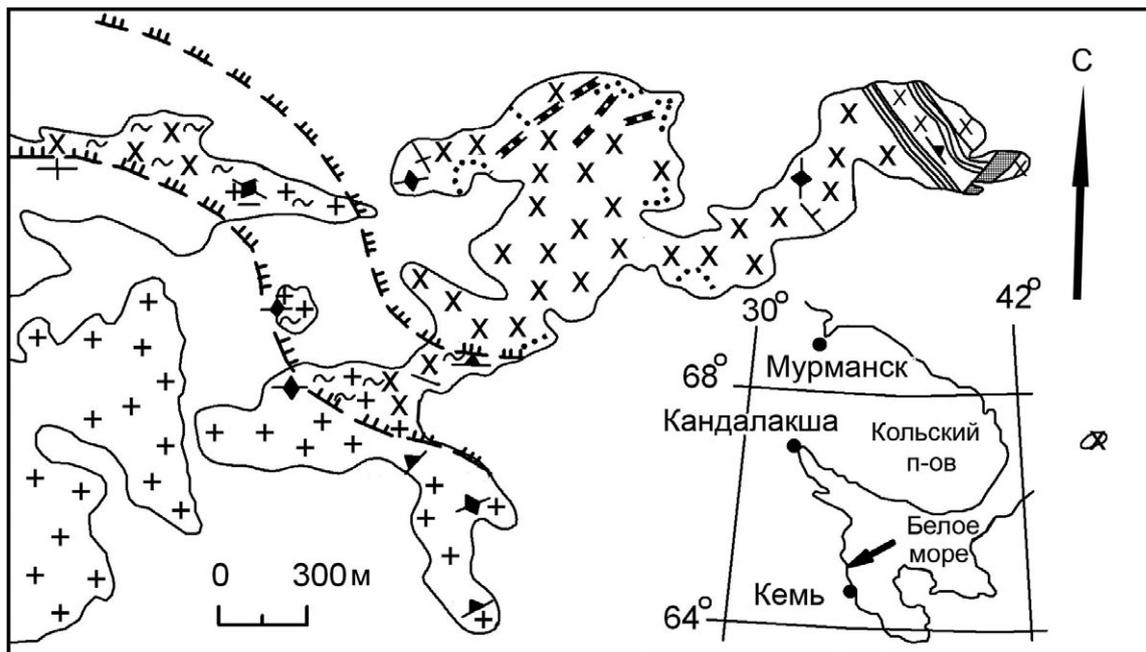


Рис. 2. Геологическая схема первого и второго Поньгомнаволоцких массивов. Сост. Н. Е. Король на основе «Геологической карты массива гиперстеновых диоритов п-ова Поньгомнаволоок Белого моря» [Zinger et al., 1996]:

1 – основные гранулиты; 2 – эндербиты-чарнокитоиды первого Поньгомнаволоцкого массива; 3 – дайки метабазитов архейского возраста; 4 – пегматиты с ортопироксеном и аплиты; 5 – дайки метабазитов протерозойского возраста; 6 – габброиды – габбро-диориты – (±) пироксеновые кварцевые диориты – гранодиориты второго Поньгомнаволоцкого массива; 7 – дайки габбро-диабазов в приконтактной зоне первого (а) и второго (б) массивов; 8 – тектонические контакты (shear-zone); 9 – границы тектонической зоны; 10 – гнейсовидность; 11 – о. Малая Луда

Fig. 2. Geological scheme of the first and second Pongomna massifs compiled by N. E. Korol on the basis of the “Geological map of a hypersthene diorite massif on Pongomnavolok Peninsula, White Sea” [Zinger et al., 1996]:

1 – mafic granulites; 2 – enderbites-charnockitoids of the first Pongomnavolok massif; 3 – metabasic rock dykes of the Archean age; 4 – pegmatites with orthopyroxene and applites; 5 – Proterozoic metabasic rock dykes; 6 – gabbroic rocks – gabbro-diorites – (±) pyroxene quartz diorites – granodiorites of the second Pongomnavolok massif; 7 – gabbro-diorite dykes in the near-contact zone of the first (a) and second (b) massifs; 8 – tectonic contacts (shear-zone); 9 – tectonic zone boundaries; 10 – gneissosity; 11 – Malaya Luda Island

роксеновые субщелочные двуполевошпатовые граниты). Интрузивные образования содержат ксенолиты основных гранулитов (табл. 1) и два вытянутых реликтовых участка (северо-восточная часть) аналогичных супракрустальных пород и секутся вместе с ними мафическими дайками. Вмещающие метаморфизованные породы, независимо от форм проявления, имеют резкие контакты с эндербитами – чарнокитоидами и пересекаются жилами последних. Основные гранулиты имеют неоднородный петрографический состав и представлены редко двупироксен-плагиоклазовыми, чаще двупироксен-амфиболовыми кристаллическими сланцами и двупироксеновыми амфиболитами.

По этим разновидностям пород при диафторезе образуются клинопироксен-плагиоклазовые (Cpx-Pl) и эклогитоподобные (Grt-Cpx-Pl) породы, а также гранат-диопсидовые амфиболиты. Реликты Орх фиксируются чаще всего в зернах моноклинных пироксенов. Наложением диафторическим изменениям подвергаются и эндербиты – чарнокитоиды первого массива. Все диафторированные разновидности пород содержат признаки ранней гранулитовой фации.

Второй Поньгомнаволоцкий массив, по данным О. И. Володичева (устн. сообщение) являющийся дифференцируемым, сложен габброидами – габбро-диоритами – двупироксеновыми: кварцевыми диоритами толеитовой

Таблица 1. Химический состав пород Поньгомнаволоцкого гранулит-эндербит-чарнокитового комплекса

Table 1. Chemical composition of the rocks of the Pongomnavolok granulite-enderbite-charnockite complex

Образцы Specimens Окислы Oxides	1-8	1-9	2-1	1-5	2-10	8-2	8-8	2-8	10-5	12-4	B-26	14-6
SiO ₂	48,74	49,88	49,68	62,02	62,60	72,80	72,46	67,06	70,06	62,10	62,00	66,38
TiO ₂	0,52	0,66	0,92	0,52	0,51	0,20	0,23	0,74	0,47	1,18	1,44	0,91
Al ₂ O ₃	14,99	14,77	14,87	16,40	17,48	14,80	14,00	14,00	14,37	13,71	13,51	13,12
Fe ₂ O ₃	2,50	1,62	4,72	1,88	1,66	0,19	1,22	2,57	1,08	1,54	2,30	1,90
FeO	7,04	7,47	7,90	3,35	3,45	2,29	2,01	2,80	2,44	6,68	6,47	4,67
MnO	0,158	0,180	0,203	0,074	0,056	0,031	0,030	0,07	0,033	0,133	0,143	0,113
MgO	10,38	9,60	6,50	2,90	1,99	0,62	0,71	1,40	0,94	2,78	2,40	2,27
CaO	9,10	10,28	9,62	5,00	4,73	3,25	2,71	2,85	2,22	5,22	5,49	3,90
Na ₂ O	2,47	3,08	3,72	5,13	4,98	4,54	4,88	3,28	3,45	3,44	3,67	3,76
K ₂ O	2,21	1,00	0,48	1,50	1,46	0,80	1,23	4,42	4,20	1,99	1,35	2,39
H ₂ O ⁻	0,18	0,06	0,11	0,08	0,20	0,19	0,21	0,20	0,20	0,01	0,08	0,07
П. п. п. LOI	1,14	0,87	0,71	0,49	0,12	0,04	0,13	0,27	0,29	0,81	0,52	0,21
P ₂ O ₅	0,11	0,11	0,10	0,30	0,37	0,16	0,07	0,18	0,20	0,40	0,49	0,29
Сумма Total	99,54	99,58	99,53	99,64	99,61	99,91	99,89	99,84	99,95	99,99	99,86	99,98
f, %	40,41	43,76	54,86	53,60	63,42	78,69	73,90	66,67	72,19	70,61	72,94	67,29
F, %	47,89	48,64	66,00	64,33	71,97	80,00	81,98	79,32	78,92	74,73	78,51	74,32

Примечание. Основные гранулиты: 1-9, 2-1 – мелкозернистые (I гранулитовый этап), переходящие в 1-8, 1-9, 2-1 среднезернистые (II гранулитовый этап) двупироксен-амфиболовые кристаллические сланцы. Эндербиты – чарноэндербиты – чарнокиты первого Поньгомнаволоцкого массива: эндербиты – 1-5, 2-10 – двупироксеновые кварцевые диориты; 8-2, 8-8 – двупироксеновые плагиограниты; 2-8 – чарноэндербиты – двупироксеновые гранодиориты; 10-5 – чарнокиты – двупироксеновые граниты. Породы второго Поньгомнаволоцкого массива: 12-4, B-26 – двупироксеновые кварцевые диориты; 14-6 – апохарноэндербиты – гранодиориты. Принятые аббревиатуры: F – $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) \times 100\%$ – общая железистость пород; f – $(\text{FeO}/\text{FeO} + \text{MgO})$ – коэффициент железистости пород, окислы в весовых процентах. При составлении таблицы использован фактический материал О. И. Володичева.

Note. Mafic granulites: 1-9, 2-1 – fine-grained (granulite stage I) passing into 1-8, 1-9, 2-1 medium-grained (granulite stage II) bipyroxene-amphibole crystalline schists. Enderbites-charnoenderbites – charnockites of Pongomnavolok massif I: enderbites – 1-5, 2-10 – bipyroxene quartz diorites; 8-2, 8-8 – bipyroxene plagiogranites; 2-8 – charnoenderbites – bipyroxene granodiorites; 10-5 – charnockites – bipyroxene granites. Rocks of Pongomnavolok massif II: 12-4, B-26 – bipyroxene quartz diorites; 14-6 – apocharnoenderbites – granodiorites.

Abbreviations used: F – $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) \times 100\%$ – total iron content of rocks; f – $(\text{FeO}/\text{FeO} + \text{MgO})$ – coefficient of the iron content of rocks, oxides, wt.% The Table was compiled using O. I. Volodichev's data.

серии и, преимущественно, гранодиоритами (табл. 1). Контакт между двумя массивами (рис. 2) описан Т. Ф. Зингер [Zinger et al., 1996] как тектонизированный, однако с наличием ксенолитов пород первого во втором. Оба массива подвержены диафорезу с сохранением реликтов ранних гранулитовых минералов. В поздней интрузии первичный минеральный состав в большей степени изменен наложенными диафорезическими процессами. По петрографическим наблюдениям единичные реликты Орх и немногочисленные Срх сохранились только в некоторых разновидностях кварцеводиоритового состава; в гранодиоритах встречается лишь моноклинный пироксен. Отличительной особенностью пород второго Поньгомнаволоцкого массива является присутствие в них автолитов, обнаруженных О. И. Володичевым при полевых исследованиях. Они соответствуют кварцевым диоритам нормального и субще-

лочного ряда и аналогично породам массива содержат редкие реликты пироксенов среди наложенных диафорезических минералов.

По геохронологическим данным, U-Pb-изотопный возраст цирконов пород первого массива соответствует 2728 Ma, второго – 2416 Ma [Zinger et al., 1996].

Поскольку внедрение второго Поньгомнаволоцкого массива осуществлялось в более поздний временной период по отношению к первому, далее в тексте отдельно рассматривается характер метаморфической эволюции каждого из них для определения возможности принадлежности к единому ГЭЧ-комплексу.

Методы исследований

В настоящей статье в основу работы положен геолого-петрологический подход, при этом ведущим методом является парагенети-

ческий анализ минералов. На основе детальных геологических, петрографических исследований, изучения изменений химизма пород и минералов восстановлены процессы метаморфической эволюции образований Поньгомнаволоцкого ГЭЧ-комплекса. Все составы минералов соответствуют микрозондовым анализам, выполненным по образцам О. И. Володичева на микроанализаторе INCA Energy-350 на базе сканирующего микроскопа VEGA II LSH (ИГ КарНЦ РАН). Для оценки термобарометрии минеральных парагенетических ассоциаций гранулитовых пород кроме традиционной программы TPF-2004 (ИЭМ РАН, авторы: В. И. Фонарев, А. А. Графчиков, А. Н. Конилов) применялся метод TWQ [Berman, 1991; Berman, Aranovich, 1996] с использованием баз (версии 1.02 и 2.32) взаимно согласованных термодинамических данных.

Гранулитовые этапы метаморфической эволюции

При геолого-петрологических исследованиях первого интрузивного массива с реликтами основных гранулитов установлено, что Поньгомнаволоцкий гранулит-эндербит-чарнокитовый комплекс характеризуется полиэтапной метаморфической эволюцией. Выделяются два гранулитовых этапа ($T = 750-884$ °С, $P = 6,30-8,10$ кбар и $750-885$ °С, $P = 6,10-8,25$ кбар) и этап диафтореза ($T = 727-590$ °С, $P = 9,00-10,90$, ед. max до 11,50, 11,86 кбар) амфиболитовой фации высоких давлений беломорского типа [Король, 2015].

I гранулитовый этап разделяется на два периода. Метаморфизм первого из них соответствовал двупироксеновой субфации гранулитовой фации. В этих условиях сформировались $Orx + Crx + Pl_{>50(63-66)}$ -парагенезисы супракрystalльных основных гранулитов – мелкозернистых двупироксен-плаггиоклазовых кристаллических сланцев. В Поньгомнаволоцком ГЭЧ-комплексе степень их сохранности минимальна.

Второй период является определяющим для I гранулитового этапа. В это время осуществляется мигматизация жильным эндербитовым материалом гранулитового субстрата и формирование I интрузивного массива эндербитов – чарнокитоидов с магматическими $Orx \pm Crx \pm Vt + Pl \pm Or + Qtz$ -парагенезисами. Вероятнее всего, вначале сформировались эндербиты, а позже, с небольшим перерывом – чарнокитоиды. С последними породами можно связывать появление раннего биотита в массиве.

Было установлено [Король, 2009], что в неорархейских гранулит-эндербит-чарнокитовых комплексах привнос натрия и воды при эндербитовой мигматизации и повышение потенциала щелочей в гранулитовой фации способствует частичной, а при увеличении интенсивности полной амфиболизации пироксенов в ранних гранулитовых парагенезисах и образованию обогащенных титаном буровато-зеленых кальциевых амфиболов. Гранулитовая амфиболизация отличается по геохимическому режиму, РТ-параметрам и типу Amp от таковой, связанной с последующим диафторезом в условиях амфиболитовой фации.

В Поньгомнаволоцком ГЭЧ-комплексе по мере нарастания замещения пироксенов амфиболами в условиях от двупироксен-роговообманковой до роговообманковой субфаций гранулитовой фации мелкозернистые основные двупироксен-плаггиоклазовые кристаллические сланцы превращаются вначале в амфиболсодержащие и далее в двупироксен-амфибол-плаггиоклазовые (рис. 3, а), а при более интенсивном процессе – в амфиболиты. Обобщенный парагенезис $Orx - Crx - Amp - Pl$ кристаллосланцев (обр. 2-1, 1-8, 1-9, 2-3, 8-6) I гранулитового этапа метаморфической эволюции соответствует: $Orx_1 (En)_{37-44}^1 + Crx_1 (Di)_{28-32}, Aug_{28-31}/_{28-32} + Amp_1 (Prg)_{37-43}^{1,60-2,41}, Mg-Hs_{41-44}^{1,79})_{37-44}^{1,60-2,41} + Pl_1 (Lbr, Anz)$. Под влиянием остаточных водных флюидов в эндербитовых магматических парагенетических ассоциациях появляется амфибол – $Orx_1 (En)_{42-45} + Crx_1 + Amp_1 (Prg)_{42-44}^{1,64-2,03} + Vt_{137}^{5,64} + Pl_1 (Olg)_{28-29} + Qtz$ (обр. 1-5, 2-10). В чарнокитоидах, завершающих процессы региональной мигматизации и гранитизации, как правило, содержится незначительное количество Amp. Приведенные выше обобщенные парагенезисы основных гранулитов и эндербитов были воспроизведены по реликтовым зернам пироксенов, амфиболов, плаггиоклазов среди аналогичных новообразованных минералов II гранулитового этапа.

II гранулитовый этап метаморфической эволюции наступает позже формирования интрузии эндербитов – чарнокитоидов и гранулитовой амфиболизации. В это время осуществляется реметаморфизм или поздняя изофациальная перекристаллизация [Король,

¹ Нижние индексы у символов железо-магнезиальных минералов обозначают общую железистость $F = (Fe^{2+} + Fe^{3+}) / (Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mg) \times 100$ %, у плаггиоклазов – содержание анортита, у ортоклазов – X_K-Or ; верхние индексы у биотитов и амфиболов – TiO_2 в весовых процентах. Индексы I и II у символов минералов означают принадлежность к I и II этапам гранулитового метаморфизма.

2011] всех разновидностей пород. В Поньгомнаволокомском ГЭЧ-комплексе эти процессы восстановлены прежде всего детальными петрографическими исследованиями при проведении парагенетического анализа. Петрографическими признаками перекристаллизации являются: укрупнение гранулитовых минералов – пироксенов, амфиболов, плагио-

клавов, при наличии биотитов и ортоклазов; формирование пойкилопорфиробластических форм их выделения, поздних каем, взаимопрорастаний, становление новообразованных $Orx_{II} + Crx_{II} \pm Amp_{II} \pm Bt_{II} + Pl_{II} \pm Or_{II} \pm Qtz$ -парагенезисов основных гранулитов, эндербитов и чарнокитоидов. Как правило, в шлифах всех разновидностей гранулитовых образований фиксируются (рис. 3, б, в) поздние (II) минеральные ассоциации с реликтами ранних (I). Процесс реметаморфизма может быть связан с остаточным влиянием Na- и K-водных флюидов магматических расплавов. Новообразованный обобщенный парагенезис (II) основных гранулитов – среднезернистых двупироксен-амфиболовых кристаллических сланцев соответствует: $Orx_{II} (En)_{35-46} + Crx_{II} (Di)_{23-35}, (Aug)_{28-42} /_{23-42} + Amp_{II} (Prp)_{34-45}, (Mg-Hs)_{37-47}, (Ed)_{36}, (Anz)_{31-49} \pm Bt_{II} /_{23-39}$ (обр. 2-1, 1-8, 1-9, 5-2, 1-11, 1-13а, 1-13б, 2-7, 2-3, 8-6).

Сравнение характеристик составов однотипных минералов из обобщенных парагенетических ассоциаций двупироксен-амфибо-

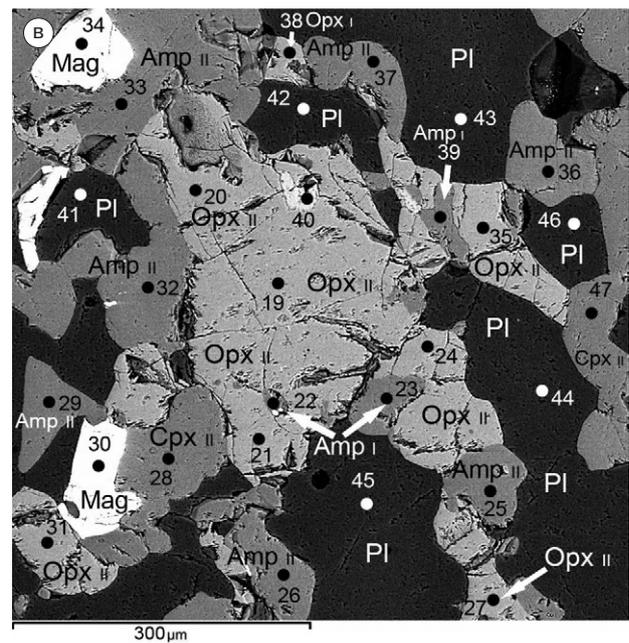
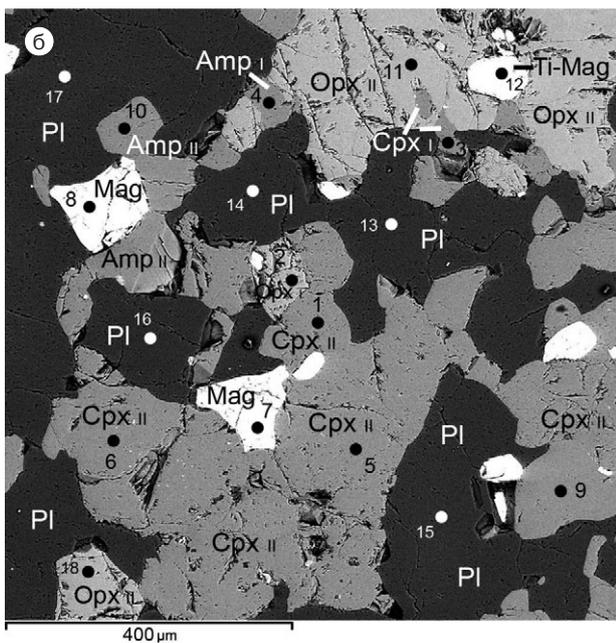
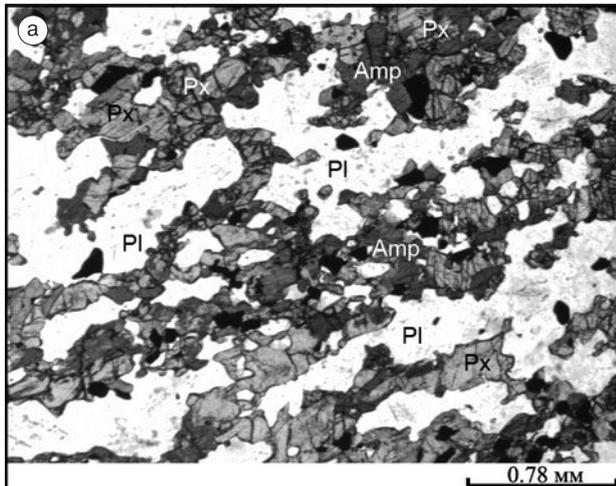


Рис. 3. Гранулитовая амфиболитизация (а) и реметаморфизм (б, в) в основных гранулитах:

а – (I гранулитовый этап): амфиболсодержащие двупироксен-плагиоклазовые переходящие в двупироксен-амфиболовые кристаллические сланцы; б, в – реликты Orx_I, Crx_I, Amp_I ранних (I) парагенезисов мелкозернистых двупироксен-амфиболовых кристаллических сланцев среди $Orx_{II}, Crx_{II}, Amp_{II}, Pl_{II} (Anz)$ из парагенетических ассоциаций реметаморфизованных (II гранулитовый этап) основных гранулитов.

Шлиф 2-1 (о. Малая Луда). Без анализатора (а), фото в отраженных электронах (б, в). Арабскими цифрами (б, в) обозначаются номера точек исследования микрозондовых анализов минералов

Fig. 3. Granulite amphibolization (a) and remetamorphism (б, в) in mafic granulites:

а – (granulite stage I): amphibole-bearing bipyroxene-plagioclase passing into bipyroxene-amphibole crystalline schists; б, в – relics of Orx_I, Crx_I, Amp_I early parageneses (I) of fine-grained bipyroxene-amphibole crystalline schists among $Orx_{II}, Crx_{II}, Amp_{II}, Pl_{II} (Anz)$ from the paragenetic associations of remetamorphosed (II granulite stage) mafic granulites.

Thin section 2-1 (Malaya Luda Island). Without an analyzer (a), photo in reflected electrons (б, в). Arabic figures (б, в) indicate the numbers of points studied by microprobe analysis of minerals

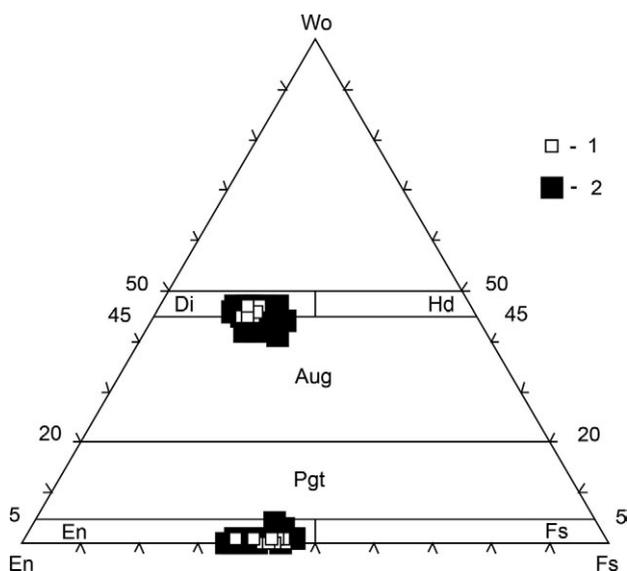


Рис. 4. Составы пироксенов основных гранулитов и их реметаморфизованных разновидностей Поньгомнаволоцкого ГЭЧ-комплекса на классификационной диаграмме I. М. А. [Morimoto, 1988]:

1–2 – точки составов пироксенов: 1 – из ранних парагенезисов мелкозернистых двупироксен-амфиболовых кристаллических сланцев (I гранулитовый этап), 2 – из поздних парагенезисов реметаморфизованных среднезернистых двупироксен-амфиболовых кристаллических сланцев (II гранулитовый этап)

Fig. 4. Compositions of mafic granulite pyroxenes and their remetamorphosed varieties from the Pongomnavolok GEC complex on the classification diagram I. M. A. [Morimoto, 1988]:

1–2 – pyroxene composition points: 1 – from the early parageneses of fine-grained bipyroxene-amphibole crystalline schists (granulite stage I), 2 – from the late parageneses of remetamorphosed medium-grained bipyroxene-amphibole crystalline schists (granulite stage II)

ловых кристаллических сланцев I и II гранулитовых этапов метаморфической эволюции Поньгомнаволоцкого ГЭЧ-комплекса привело к следующему. Прежде всего как в первых (I), так и во вторых (II) парагенезисах ромбические пироксены представлены энстатитами [Morimoto, 1988], близкими по составам (рис. 4). Однако в Орх наблюдаются небольшие изменения значений железистости (F) от 37–44 % (I) до 35–46 % (II) с уменьшением в нижнем и возрастанием в верхнем пределах ее колебаний. Подобные закономерности фиксируются (рис. 4) и в моноклинных пироксенах – диопсидах ($F_{I-II} = 28-32\% \rightarrow 23-35\%$) и авгитах ($F_{I-II} = 28-31\% \rightarrow 28-42\%$). При этом колебания компонентов минального состава Срх ($Di_1 - 46-47\% Wo - 36-38\% En - 15-17\% Fs \rightarrow Di_{II} - 45-47\% Wo - 35-41\% En - 13-19\% Fs$; $Aug_1 - 45\% Wo - 38-40\% En - 15-17\% Fs \rightarrow Aug_{II} - 41-45\% Wo - 36-41\% En - 15-19\% Fs$) практически сохраняют те же тенденции.

Гранулитовые амфиболы (I, II) представлены [Leake et al., 1997] Prg, Mg-Hs, в единичном случае (II) Ed (рис. 5, а). При переходах от Amr_I к Amr_{II} зафиксировано небольшое увеличение железистости и оксида титана в верхнем пределе их колебаний (рис. 5, б). В паргаситах эти величины составляют: $F_{I-II} = 37-43\% \rightarrow 34-45\%$, $TiO_2 = 1,60-2,41\% \rightarrow 1,54-2,46\%$, в магнезиогастингситах – $41-44\% \rightarrow 37-47\%$ и $1,79\% \rightarrow 1,50-2,25\%$. В единичных случаях в гранулитовых амфиболах (I и II) фиксируются незначительно пониженные содержания оксида титана (1,42–1,46 %). В реметаморфизованных парагенезисах основных гранулитов появляется биотит ($F = 23-39\%$) с достаточно широкими вариациями TiO_2 от 4,66 до 6,39 %. Ранние генерации Pl_I (Lbr – 63–66 % An) сохраняются очень редко. Плагиоклазы перекристаллизованных (II) двупироксен-амфиболовых кристаллических сланцев представлены андезинами (31–49 % An).

На фоне общих характеристик изменений или постоянства минерального состава при переходах от мелкозернистых (I) двупироксен-амфиболовых кристаллических сланцев к реметаморфизованным (II) среднезернистым их разновидностям приводятся данные по результатам исследований основных гранулитов (обр. 2–1) острова Малая Луда Белого моря. Породы слагают вытянутый реликтовый участок среди эндербитов – чарнокитоидов первого Поньгомнаволоцкого массива. В пределах развития основных гранулитов среди реметаморфизованных (II) Орх, Срх, Amr сохраняются реликты таковых I гранулитового этапа (рис. 3, б, в). Химические составы породы и минералов представлены в табл. 1–4. Изучение однотипных минералов (I, II) в микроучастках (обр. 2–1) приводит к следующим результатам. В Орх при переходе от En_I к En_{II} наблюдается либо небольшое повышение железистости (т. 2 и 11 на рис. 3, б; т. 38 и 35 на рис. 3, в; табл. 2), либо значения данной величины могут оставаться и постоянными (т. 64 и 48, 121 и 112 в табл. 2). В диопсидах (Di_I и Di_{II}) те же тенденции ($F_{I-II} = 32\%$) сохраняются: (т. 3 и 1 на рис. 3, б; табл. 3). В авгитах (Aug_I и Aug_{II}) зафиксировано увеличение железистости от 28 до 32 % (точки 55 и 65 в табл. 3) и повышение ферросилитовой составляющей в минальном составе от 15 до 19 %. В амфиболах (I и II) основных гранулитов отсутствует зависимость между содержанием оксида титана и F (табл. 4). Железистость в паргаситах (Prg_I и Prg_{II}) может очень незначительно увеличиваться (точки 39 и 37 на рис. 3, в; 53 и 56 в табл. 4) либо оставаться неизменной (точки 4 и 10 на рис. 3, б; 120

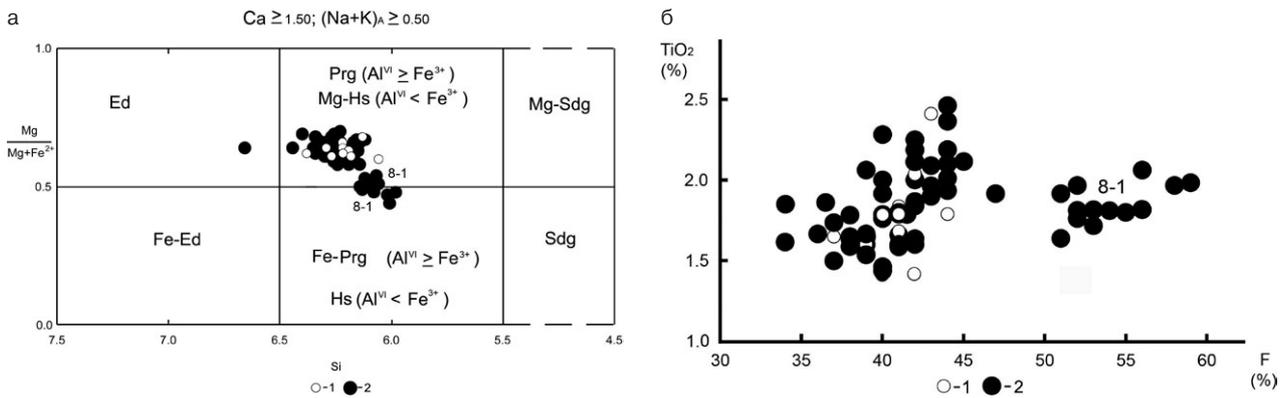


Рис. 5. Составы кальциевых амфиболов основных гранулитов Поньгомнаволоцкого ГЭЧ-комплекса на классификационной диаграмме (а) $Mg/(Mg+Fe^{2+}) - Si$ [Leake et al., 1997] и (б) $TiO_2 - F$.

Точки составов амфиболов: 1 и 2 – из ранних (1) реликтовых двупироксен-амфибол-плаггиоклазовых парагенезисов (I) мелкозернистых двупироксен-амфиболовых кристаллических сланцев и перекристаллизованных (2) двупироксен-амфибол-плаггиоклазовых ($\pm Bt$) парагенезисов (II) реметаморфизованных основных гранулитов

Fig. 5. Compositions of calcium amphiboles of mafic granulites from the Pongomnavolok GEC complex on a classification diagram (a) $Mg/(Mg+Fe^{2+}) - Si$ [Leake et al., 1997] and $TiO_2 - F$ (б):

Amphibole composition points: 1 and 2 – from the early (1) relict bipyroxene-amphibole-plagioclase parageneses (I) of fine-grained bipyroxene-amphibole crystalline schists and the recrystallized (2) bipyroxene-amphibole-plagioclase ($\pm Bt$) parageneses (II) of remetamorphosed mafic granulites.

и 111 в табл. 4). $Mg-Hs_I$ встречается в единичном случае (т. 23 на рис. 3, в; табл. 4) и по значениям F (41 %) и TiO_2 (1,79 %) занимает промежуточную позицию по отношению к $Mg-Hs_{II}$ (40–42 и 1,58–2,00 % – точки 25, 29, 33, 36 на рис. 3, в; табл. 4). В целом обобщенные парагенезисы I и II в изученных микроучастках основных гранулитов о-ва Малая Луда соответствуют: $Orx_I (En)_{42-44} + Crx_I (Di_{32}, Aug_{28/28-32} + Amp_I (Prg_{39-42}^{1,60-1,84}, Mg-Hs_{41}^{1,79})_{39-42}^{1,60-1,84} + Pl_{I>50}$ и $Orx_{II} (En)_{42-45} + Crx_{II} (Di_{31-33}, Aug_{32-33})_{31-33} + Amp_{II} (Prg_{39-42}^{1,64-1,84}, Mg-Hs_{37-42}^{1,50-2,00})_{37-42}^{1,50-2,00} + Pl_{II} (Anz)_{31-38}$. В данных парагенетических ассоциациях отсутствует биотит.

В итоге преобразование мелкозернистых основных двупироксен-амфиболовых кристаллосланцев (I) в среднезернистые (II) их разновидности осуществляется с незначительными повышениями железистости (F), чаще в пироксенах, чем в амфиболах. Допустимым является появление биотита. Плаггиоклазы поокисляются от лабрадоров до андезинов.

Следует отметить, что на фоне описанных выше исключение представляет парагенетическая ассоциация (II) основных гранулитов (обр. 8–1): $Orx_{II} (En) + Crx_{II} (Di_{38-39}, Aug_{40/38-40} + Amp_{II} (Prg_{52}^{1,76}, Prg - Fe-Prg_{52-53}^{1,72-1,97}, Mg-Hs_{51-54}^{1,64-1,92}, Hs_{55-59}^{1,80-2,06})_{51-59}^{1,64-2,06} \pm Bt_{II 44}^{5,90} + Pl_{II} (Anz)_{34-40}$. Составы моноклинных пироксенов и плаггиоклазов здесь сопоставимы с таковыми минералами в обобщенном парагенезисе. Но повышенными значениями железистости отличаются гранулитовые амфиболы (рис. 5) и био-

титы, при практически сопоставимых содержаниях оксида титана. Эта парагенетическая ассоциация (обр. 8–1) составлена по реликтам гранулитовых минералов среди эклогитоподобных пород.

Обобщенный парагенезис реметаморфизованных эндербитов первого Поньгомнаволоцкого массива соответствует $Orx_{II} (En)_{40-50} + Crx_{II} (Di_{24-33}, Aug_{27-33})_{24-33} + Amp_{II} (Prg_{41-49}^{1,75-2,21}, Mg-Hs_{45}^{1,92-1,93})_{41-49}^{1,75-2,21} + Bt_{II 34-39}^{4,54-5,88} + Pl_{II} (Anz_{31-32}, Olg_{19-29/19-32} \pm Kfs_{II} (Or)_{1,00-0,92} + Qtz$. В его состав входят породообразующие минералы из двупироксеновых кварцевых диоритов и $Orx - Crx$ -плаггиогранитов (табл. 1, обр. 1–5, 2–10 и 8–2, 8–8; рис. 6 и 7). Реликты энстатитов, паргаситов, биотитов ранних генераций (I) сохранились всего лишь в двупироксеновых кварцевых диоритах (табл. 1, обр. 1–5). Выше в статье именно по этим минералам была составлена и приведена парагенетическая ассоциация эндербитов I гранулитового этапа с добавлением единственного и близкого по составу к предыдущим пироксенам En_I (табл. 1, обр. 2–10). При реметаморфизме в двупироксеновых кварцевых диоритах (обр. 1–5) образуется парагенезис II – $Orx_{II} (En)_{44-45} + Crx_{II} (Di_{24-33}, Aug_{27-33})_{24-33} + Amp_{II} (Prg)_{44-45}^{1,86-1,99} + Bt_{II 38}^{5,88} + Pl_{II} (Olg)_{24-29} + Qtz$. Было проведено сопоставление характеристик составов однотипных минералов из парагенетических ассоциаций эндербитов (I и II). Выяснилось, что в ходе поздней изофацальной перекристаллизации в ромбических пироксенах ($En_I \rightarrow En_{II}$) наблю-

Таблица 2. Микрзондовые анализы и пределы колебаний компонентов ромбических пироксенов основных гранулитов в образце 2-1

Table 2. Microprobe analyses and variation ranges of the components of orthopyroxenes of mafic granulites in sample 2-1

№ анализов, компоненты № of analyses, components	т. 2	т. 11	т. 38	т. 35	т. 64	т. 48	т. 121	т. 112	Пределы колебаний компонентов Variation ranges of components	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
SiO ₂	50,68	49,37	49,07	48,47	49,78	49,40	50,07	50,54	49,07–50,68	48,47–50,67
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	2,05	2,15	1,85	1,89	2,02	2,30	1,75	1,95	1,51–2,16	1,59–2,30
FeO	26,53	27,33	26,44	27,44	26,95	25,95	26,97	26,93	26,37–27,42	25,69–27,44
MnO	0,81	0,70	1,15	0,89	0,93	0,92	0,75	0,83	0,73–1,15	0,61–1,15
MgO	20,01	19,36	20,06	18,90	19,94	19,34	20,13	19,75	19,43–20,55	18,90–20,53
CaO	0,40	0,31	0,31	0,36	0,38	0,00	0,34	0,00	0,31–0,53	0,00–0,46
Na ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Сумма, n Total, n	100,48	99,22	98,88	97,95	100,00	97,91	100,01	100,00	7	15
Si	1,91	1,89	1,88	1,88	1,89	1,91	1,90	1,92	1,87–1,91	1,88–1,93
Al ^{IV}	0,09	0,10	0,08	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07–0,10	0,07–0,10
Al ^{VI}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00–0,01
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ³⁺	0,09	0,12	0,16	0,15	0,14	0,07	0,13	0,08	0,09–0,16	0,06–0,18
Fe ²⁺	0,74	0,75	0,68	0,75	0,72	0,77	0,72	0,77	0,68–0,76	0,68–0,79
Mn	0,03	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02–0,04	0,02–0,04
Mg	1,12	1,10	1,14	1,09	1,13	1,11	1,14	1,12	1,10–1,15	1,09–1,15
Ca	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01–0,02	0,00–0,02
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Wol – En – Fs, %	1-56-43	1-55-44	1-56-43	1-56-43	1-55-44	0-56-44	1-56-43	0-56-44	1-55-56-43-44	0-1-53-57-42-46
f, %	39,78	40,54	37,36	40,76	38,92	40,96	38,71	40,74	37,36–40,86	37,50–41,80
F, %	42,56	44,16	42,42	45,23	43,22	43,08	42,71	43,15	41,92–43,94	41,62–45,23
Тип Орх Type of Орх	En	En								

Примечание. Обр 2-1 – точки Орх_I (2, 38, 64, 115, 118, 119, 121) из мелкозернистых двупироксен-амфиболовых кристаллических сланцев I гранулитового этапа (I), переходящих в реметаморфизованные среднезернистые двупироксен-амфиболовые кристаллические сланцы II гранулитового этапа (II) – точки Орх_{II} (11, 18–21, 24, 27, 31, 35, 48–50, 54, 112, 122). Номера точек микрзондовых анализов 2, 11, 18 соответствуют таковым на рис. 3, б; 19–21, 24, 27, 31, 35, 38 – на рис. 3, в. n – количество анализов; f = Fe²⁺ / (Fe²⁺ + Mg) × 100, % – коэффициент железистости, F = (Fe²⁺ + Fe³⁺) / (Fe²⁺ + Fe³⁺ + Mg) × 100 % – общая железистость минералов.

Note. Sample 2-1 – points Орх_I – 2, 38, 64, 115, 118, 119, 121 – from fine-grained bipyroxene-amphibole crystalline schists of the granulite stage I – (I) passing into remetamorphosed medium-grained bipyroxene-amphibole crystalline schists of the granulite stage II – (II) – points of Орх_{II} – 11, 18–21, 24, 27, 31, 35, 48–50, 54, 112, 122. Numbers of points of microprobe analyses: 2, 11, 18 correspond with those in Figs. 3 б; 19–21, 24, 27, 31, 35, 38 – in Fig 3 в. n – number of analyses; f = Fe²⁺ / (Fe²⁺ + Mg) × 100, % – coefficient of iron content, F = (Fe²⁺ + Fe³⁺) / (Fe²⁺ + Fe³⁺ + Mg) × 100 % – total iron content of minerals.

дается небольшая тенденция в сторону увеличения железистости (F) как в нижнем (42–45 % → 44–45 %, обр. 1–5), так и в верхнем пределе колебаний (42–45 % → 40–50 %, обобщенный парагенезис). Моноклинные пироксены (Di_{II}, Aug_{II}) эндербитов изучены только в реметаморфизованных разновидностях и являются менее железистыми (24–33 %) по сравнению с равновесными энстатитами (II). При переходе

от Prg_I к Prg_{II} фиксируется небольшое возрастание значения F (42–44 % → 44–45 %, обр. 1–5; 41–49 %, обобщенный парагенезис) практически в верхнем пределе колебаний данной величины. Четкой закономерности одновременного увеличения оксида титана не наблюдается. В биотитах от ранней к поздней генерации железистость очень незначительно увеличивается (37 и 38 %, обр. 1–5) при очень близких

Таблица 3. Микрзондовые анализы и пределы колебаний компонентов моноклинных пироксенов основных гранулитов в образце 2–1

Table 3. Microprobe analyses and variation range of the components of clinopyroxenes from mafic granulites in sample 2–1

№№ анализов, компоненты №№ of analyses, components	т. 3	т. 1	т. 55	т. 65	Пределы колебаний компонентов Variation ranges of components	
	I	II	I	II	II	II
SiO ₂	50,67	50,21	50,68	50,94	50,21–51,36	50,22–51,40
Al ₂ O ₃	3,16	4,13	2,74	3,26	2,58–4,13	2,55–3,26
FeO	10,30	10,24	9,25	10,82	10,00–10,83	10,60–11,00
MnO	0,00	0,00	0,00	0,47	0,00	0,00–0,47
MgO	12,45	11,97	13,64	12,45	11,97–12,62	12,45–12,51
CaO	21,06	20,68	21,30	20,93	20,64–21,62	19,90–20,93
Na ₂ O	0,84	1,26	0,84	1,13	0,99–1,29	1,13–1,42
Сумма, n Total, n	98,48	98,49	98,45	100,00	6	3
Si	1,92	1,89	1,91	1,90	1,89–1,94	1,90–1,91
Al ^{IV}	0,08	0,11	0,09	0,10	0,06–0,11	0,09–0,10
Al ^{VI}	0,06	0,07	0,03	0,04	0,05–0,08	0,02–0,05
Fe ³⁺	0,09	0,12	0,13	0,14	0,08–0,14	0,14
Fe ²⁺	0,24	0,20	0,16	0,19	0,18–0,25	0,18–0,21
Mn	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00–0,01
Mg	0,70	0,67	0,76	0,69	0,67–0,70	0,69–0,71
Ca	0,85	0,84	0,86	0,84	0,84–0,86	0,81–0,84
Na	0,06	0,09	0,06	0,08	0,07–0,10	0,08–0,10
Jd	5,80	7,75	2,69	4,10	5,20–7,75	2,92–4,92
Ac	0,36	1,46	3,43	4,06	0,00–4,30	4,06–5,43
Ts _{tot}	8,28	10,60	9,46	10,22	6,36–11,20	8,54–10,22
Wo	38,53	36,47	38,16	36,65	36,45–38,94	36,36–36,82
En	35,08	33,63	38,20	34,55	33,35–34,94	34,55–35,49
Fs	11,95	10,09	8,08	10,43	8,95–12,40	9,18–11,26
Wo – En – Fs, %	46–37–17	46–37–17	45–40–15	44–37–19	45–46–36–37–17–18	43–45–37–38–18–19
f, %	25,53	22,99	17,39	21,59	20,93–27,17	20,69–22,83
F, %	32,04	32,32	27,62	32,35	31,37–33,01	31,68–33,02
Тип Срх Type of Срх	Di	Di	Aug	Aug	Di	Aug

Примечание. Обр 2–1 – точки Срх (Di и Aug) – 3 и 55 из мелкозернистых двупироксен-амфиболовых кристаллических сланцев I гранулитового этапа (I), переходящих в реметаморфизованные среднезернистые двупироксен-амфиболовые кристаллические сланцы II гранулитового этапа (II) – точки Срх_{II} (Di и Aug) – 1, 5, 9, 28, 47, 51 и 6, 52, 65.

Точки микрзондовых анализов 1, 3, 5, 6, 9 соответствуют таковым на рис. 3, б; 28, 47 – на рис. 3, в.

Пироксены здесь и далее рассчитывались по программе [Cawthorn, Collerson, 1974] и с использованием компьютерной программы PX [Cebria, 1990]. Ts_{tot} – сумма Ca-Fe-, Ca-Ti-, Ca-Ts-молекул; n – количество анализов.

Note. Sample 2–1 – points Срх (Di and Aug) – 3 and 55 – from fine-grained bipyroxene-amphibole crystalline schists of the granulite stage I – (I) passing into remetamorphosed medium-grained bipyroxene-amphibole crystalline schists of the granulite stage II – (II) – points of Срх_{II} (Di and Aug) – 1, 5, 9, 28, 47, 51 and 6, 52, 65. The points of microprobe analyses 1, 3, 5, 6, 9 correspond with those in Figs. 3 б; 28, 47 – in Fig. 3 в. Pyroxenes were estimated using the software described in [Cawthorn & Collerson, 1974] and PX computer program [Cebria, 1990]. Ts_{tot} is total Ca-Fe, Ca-Ti, Ca-Ts-molecules; n is the number of analyses.

значения TiO₂ (5,64 и 5,88 %). Фактически в перекристаллизованных (II) эндербитах происходят достаточно небольшие возрастания железистости в энстатитах, паргаситах, биотитах и на конкретных примерах отмечается очень незначительное поокисление плагиоклазов.

Приведенные факты свидетельствуют о том, что в основных гранулитах и эндербитах Поньгомнаволоцкого ГЭЧ-комплекса процессы ре-

метаморфизма характеризуются компенсационной метаморфической перекристаллизацией и незначительным выносом магния, при приносе щелочей (Na и K) и воды.

Чарноэндербиты – Орх_{II} + Срх_{II} (Di_{32–35}, Aug_{34–38})_{32–38} + Amp_{II} (Prg_{40–42})_{1,68–1,96}, Mg-Hs_{40–43}_{1,52–1,90})_{40–43}_{1,52–1,96} + Bt_{II}₂₈_{5,40} + Pl_{II} (Olg)₂₄ + Kfs_{II} (Or)_{0,92} + Qtz и чарнокиты – Орх_{II} (En)_{43–47} + Срх_{II} + Bt_{II}_{32–35}_{4,58–5,12} + Pl_{II} (Olg)₂₄ + Kfs_{II} (Or)_{0,93} + Qtz

Таблица 4. Микрозондовые анализы и пределы колебаний компонентов кальциевых амфиболов основных гранулитов в образце 2-1
 Table 4. Microprobe analyses and the variation ranges of the components of calcium amphiboles of mafic granulites in sample 2-1

№ анализ, компоненты № of analyses, components	Т. 4		Т. 10		Т. 39		Т. 37		Т. 53		Т. 56		Т. 120		Т. 111		Пределы колебаний компонентов Variation ranges of components				
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	
SiO ₂	42,18	42,52	43,72	42,55	42,46	43,20	42,55	42,46	42,46	42,47	42,47	43,20	42,55	42,47	42,62	42,47	42,47	42,18-43,72	42,75	42,19-44,54	42,10-43,29
TiO ₂	1,42	1,79	1,78	1,84	1,68	1,64	1,84	1,68	1,68	1,66	1,66	1,64	1,84	1,66	1,84	1,66	1,60-1,84	1,79	1,64-1,84	1,50-2,00	
Al ₂ O ₃	12,21	12,61	11,52	12,79	12,65	12,19	12,79	12,65	12,65	12,72	12,72	12,19	12,79	12,72	12,73	12,72	11,52-12,73	12,38	11,31-13,20	11,51-12,71	
FeO	15,34	15,53	14,62	15,75	15,40	15,62	15,75	15,40	15,40	15,36	15,36	15,62	15,75	15,36	15,21	15,36	14,62-15,40	15,71	14,47-15,75	14,26-16,16	
MnO	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	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
MgO	11,84	12,31	12,47	12,10	12,38	12,00	12,10	12,38	12,38	12,27	12,27	12,00	12,10	12,27	12,07	12,27	11,84-12,88	12,45	12,00-12,82	12,45-13,37	
CaO	11,19	11,67	12,73	11,87	11,94	11,83	11,87	11,94	11,94	11,71	11,71	11,83	11,87	11,71	11,97	11,71	11,19-12,73	11,67	11,53-12,16	11,15-12,10	
Na ₂ O	1,73	2,08	1,77	1,75	2,25	2,28	1,75	2,25	2,25	2,47	2,47	2,28	1,75	1,91	1,91	2,47	1,73-2,56	2,04	1,75-2,47	1,92-2,23	
K ₂ O	1,35	1,48	1,40	1,35	1,25	1,25	1,35	1,25	1,25	1,32	1,32	1,25	1,35	1,41	1,41	1,32	1,15-1,41	1,21	1,07-1,48	1,21-1,48	
Сумма, n Total, n	97,26	99,99	100,01	100,00	100,01	100,01	100,00	100,00	100,01	99,98	99,98	100,01	100,00	99,98	99,76	99,98	5	100,00	9	7	
Si	6,29	6,20	6,38	6,20	6,19	6,29	6,20	6,19	6,19	6,19	6,19	6,29	6,20	6,19	6,22	6,19	6,19-6,38	6,22	6,16-6,44	6,16-6,30	
Al ^{IV}	1,71	1,80	1,62	1,80	1,81	1,71	1,80	1,81	1,81	1,81	1,81	1,71	1,80	1,78	1,78	1,81	1,62-1,81	1,78	1,56-1,84	1,70-1,84	
Al ^{VI}	0,44	0,36	0,36	0,40	0,37	0,39	0,40	0,37	0,37	0,38	0,38	0,39	0,40	0,41	0,41	0,38	0,35-0,44	0,34	0,35-0,42	0,28-0,39	
Ti	0,16	0,20	0,20	0,20	0,18	0,18	0,20	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,20	0,20	0,20	0,18	0,17-0,20	0,20	0,18-0,20	0,16-0,22	
Fe ³⁺	0,41	0,36	0,10	0,38	0,32	0,25	0,38	0,32	0,32	0,30	0,30	0,25	0,38	0,28	0,28	0,30	0,10-0,41	0,41	0,20-0,38	0,34-0,52	
Fe ²⁺	1,50	1,53	1,68	1,53	1,55	1,65	1,53	1,55	1,55	1,56	1,56	1,65	1,58	1,56	1,58	1,56	1,46-1,68	1,50	1,46-1,65	1,25-1,55	
Mn	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	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Mg	2,63	2,67	2,71	2,63	2,69	2,60	2,63	2,63	2,69	2,66	2,66	2,60	2,63	2,63	2,63	2,66	2,63-2,79	2,70	2,60-2,76	2,73-2,87	
Ca	1,79	1,82	1,99	1,85	1,87	1,85	1,85	1,87	1,87	1,83	1,83	1,85	1,87	1,87	1,87	1,83	1,79-1,99	1,82	1,81-1,88	1,72-1,89	
Na	0,50	0,59	0,50	0,49	0,64	0,64	0,49	0,64	0,64	0,70	0,70	0,64	0,54	0,70	0,54	0,70	0,50-0,72	0,57	0,49-0,70	0,55-0,62	
K	0,26	0,28	0,26	0,25	0,23	0,23	0,25	0,23	0,23	0,25	0,25	0,23	0,26	0,25	0,26	0,25	0,21-0,26	0,22	0,20-0,28	0,23-0,27	
f, %	36,62	36,43	38,27	36,78	36,56	38,82	36,78	36,56	36,56	36,97	36,97	38,82	37,53	36,97	37,53	36,97	34,35-38,27	35,71	34,84-38,82	30,34-35,76	
F, %	42,07	41,45	39,64	42,07	41,01	42,22	42,07	41,01	41,01	41,15	41,15	42,22	41,43	41,15	41,43	41,15	39,08-42,07	41,43	38,80-42,22	37,34-41,56	
(Na+K) _A	0,64	0,76	0,75	0,66	0,79	0,79	0,66	0,79	0,79	0,85	0,85	0,79	0,73	0,85	0,73	0,85	0,64-0,84	0,70	0,66-0,85	0,70-0,78	
Na _B	0,12	0,10	0,01	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,08	0,07	0,09	0,07	0,09	0,01-0,12	0,10	0,06-0,10	0,06-0,15	
Тип Amp Type of Amp	Prg	Prg	Prg	Prg	Prg	Prg	Prg	Prg	Prg	Prg	Prg	Prg	Prg	Prg	Prg	Prg	Prg	Mg-Hs	Prg	Mg-Hs	

Примечание: Обр 2-1 – точки Amp, (Prg и Mg-Hs) – 4, 22, 39, 53, 120 и 23 из мелкозернистых двуокисен-амфиболовых кристаллических сланцев I гранулитового этапа (I), переходящих в реметаморфизованные среднезернистые двуокисен-амфиболовые кристаллические сланцы II гранулитового этапа (II) – точки Amp_I (Prg и Mg-Hs) – 10, 26, 32, 37, 56, 109, 111, 114, 116 и 25, 29, 33, 36, 110, 113, 117. Точки микрозондовых анализов 4, 10 соответствуют таковым на рис. 3; 6; 22, 23, 25, 26, 29, 32, 33, 36, 37, 39 – на рис. 3, в. Расчет амфиболов проводился по программе [Schumacher, 1997]; n – количество анализов.

Note. Sample 2-1 – points Amp, (Prg and Mg-Hs) – 4, 22, 39, 53, 120 and 23 are from fine-grained bipyroxene-amphibole crystalline schists of the granulite stage I – (I) passing into remeta-morphosed medium-grained bipyroxene-amphibole crystalline schists of the granulite stage II – (II) – points Amp_I, (Prg and Mg-Hs) – 10, 26, 32, 37, 56, 109, 111, 114, 116 and 25, 29, 33, 36, 110, 113, 117. Points of microprobe analyses 4, 10 correspond with those in Fig. 3; 6; 22, 23, 25, 26, 29, 32, 33, 36, 37, 39 in Fig. 3. Data on minerals were estimated using the program [Schumacher, 1997]; n is the number of analyses.

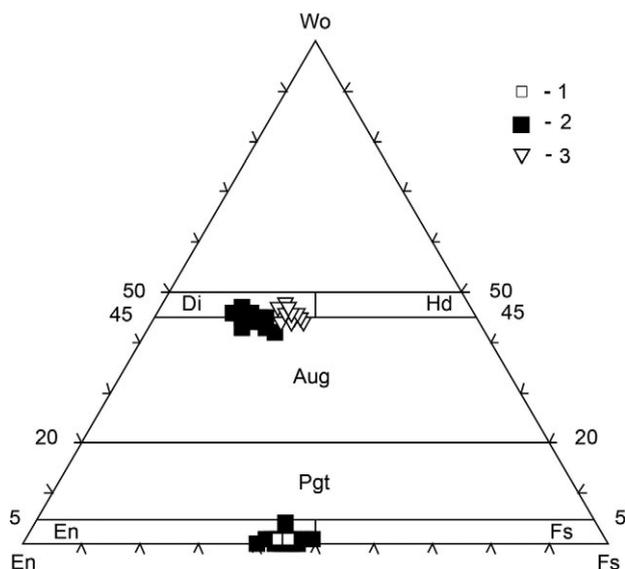


Рис. 6. Составы пироксенов эндербитов-чарнокитоидов I и II Поньгомнаволоцких массивов на классификационной диаграмме I. М. А. [Morimoto, 1988]:

1–3 – точки составов пироксенов: 1 – из ранних (I гранулитовый этап) реликтовых парагенезисов эндербитов – дупироксеновых кварцевых диоритов первого Поньгомнаволоцкого массива, 2 – из поздних (II гранулитовый этап) парагенезисов реметаморфизованных эндербитов-чарноэндербитов-чарнокитов первого Поньгомнаволоцкого массива, 3 – из дупироксеновых кварцевых диоритов второго Поньгомнаволоцкого массива

Fig. 6. Compositions of pyroxenes of enderbites-charnockitoids I and II from the Pongomnavolok massifs on the classification diagram I. M. A. [Morimoto, 1988]:

1–3 – pyroxene composition points: 1 – from early (granulite stage I) relict parageneses of enderbites – bipyroxene quartz diorites of Pongomnavolok massif I, 2 – from late (granulite stage II) parageneses of remetamorphosed enderbites-charnoenderbites-charnockites of the first Pongomnavolok massif, 3 – from bipyroxene quartz diorites of the second Pongomnavolok massif

первого Поньгомнаволоцкого массива представлены только реметаморфизованными разновидностями (табл. 1, обр. 2–8 и 10–5; рис. 6 и 7).

Термобарометрия гранулитовых образований. РТ-параметры метаморфической эволюции всех типов гранулитовых образований Поньгомнаволоцкого ГЭЧ-комплекса устанавливались прежде всего с использованием компьютерной программы TPF-2004. Для определения температур формирования гранулитовых парагенезисов применялись Crx – Орх-, Hbl – Crx-, реже Vt – Орх-, Pl – Hbl – Qtz-, Hbl – Pl-геотермометры, а режим давлений устанавливался по трем Hbl-геобарометрам (табл. 5). Значения P и T образования конкретных парагенетических ассоциаций основных гранулитов и эндербитов первого Поньгомнаволоцкого массива определялись и по программам TPF-

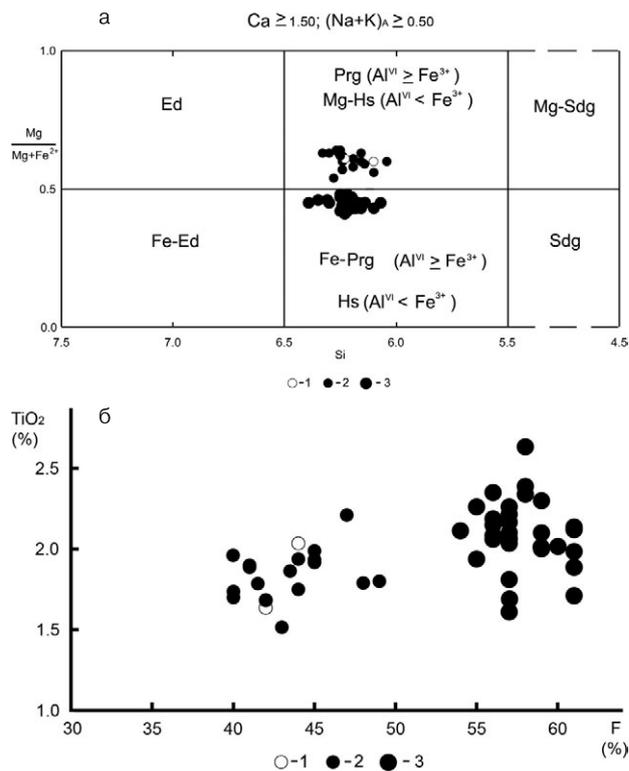


Рис. 7. Составы кальциевых амфиболов эндербитов-чарнокитоидов первого и второго Поньгомнаволоцких массивов на классификационной диаграмме (а) Mg/ (Mg+Fe²⁺) – Si [Leake et al., 1997] и (б) TiO₂ – F :

1–3 – точки составов амфиболов: 1 – из ранних (I гранулитовый этап) реликтовых парагенезисов эндербитов (дупироксеновых кварцевых диоритов) и 2 – из реметаморфизованных (II гранулитовый этап) эндербитов – чарноэндербитов первого Поньгомнаволоцкого массива; 3 – из гранодиоритов (апочарноэндербитов), дупироксеновых кварцевых диоритов второго Поньгомнаволоцкого массива

Fig. 7. Compositions of calcium amphibols of enderbites-charnockitoids I and II from the Pongomnavolok massifs on the classification diagram (a) Mg/ (Mg+Fe²⁺) – Si [Leake et al., 1997] and TiO₂ – F (б):

1–3 – amphibole composition points: 1 – from early (granulite stage I) relict parageneses of enderbites (bipyroxene quartz diorites) and 2 – from remetamorphosed (granulite stage II) enderbites – charnoenderbites of the first Pongomnavolok massif; 3 – from granodiorites (apocharnoenderbites), bipyroxene quartz diorites of the second Pongomnavolok massif

2004 и TWQ. Результативные данные пределов колебаний температуры и давления для обобщенных парагенезисов, поля и точки РТ-параметров формирования пород на I и II гранулитовых этапах метаморфической эволюции Поньгомнаволоцкого ГЭЧ-комплекса приведены в табл. 5 и на рис. 8.

Были сопоставлены значения РТ-параметров (TPF-2004 и TWQ) в отдельных парагенетических ассоциациях основных гранулитов (обр. 2–1). Изучались парагенезисы I (табл. 6, № 1 и 3, пр. 2-1-21 и 2-1-22; рис. 3, б, в, и 8) и II

Таблица 5. РТ-параметры пород Поньгомнаволоцкого гранулит-эндербит-чарнокитового комплекса

Table 5. PT-parameters of the rocks of the Pongomnavolok granulite-enderbite-charnockite complex.

Породы, условия метаморфизма Rocks and metamorphic conditions	T °C	P, кбар P, kbar
Основные гранулиты: мелкозернистые двупироксен-амфиболовые кристаллические сланцы Первый (I) этап гранулитового метаморфизма Mafic granulites: fine-grained bipyroxene-amphibole crystalline schists. The first (I) stage of granulite-facies metamorphism	750–884, max 891, 924, 933	6,30–8,00
Реметаморфизованные основные гранулиты: среднезернистые двупироксен-амфиболовые кристаллические сланцы Второй (II) этап гранулитового метаморфизма Remetamorphosed mafic granulites: medium-grained bipyroxene-amphibole crystalline schists. The second (II) stage of granulite-facies metamorphism	750–885, max 899–927	6,10–8,25
(I) Эндербиты первого Поньгомнаволоцкого массива эндербитов – чарнокитоидов (I) Enderbites of the first Pongomnavolok enderbite-charnokitoid massif	755–835	7,30–8,10
(II) Реметаморфизованные эндербиты – чарнокитоиды первого Поньгомнаволоцкого массива (II) Remetamorphosed enderbites-charnokitoids of the first Pongomnavolok massif.	750–875, max 892, 895, 916	6,20–8,17 max 8,43
(I) Основные гранулиты и эндербиты первого Поньгомнаволоцкого массива (I) Mafic granulites and enderbites of the first Pongomnavolok massif	750–884	6,30–8,10
(II) Реметаморфизованные – основные гранулиты и эндербиты – чарнокитоиды первого Поньгомнаволоцкого массива (II) Remetamorphosed mafic granulites and enderbites-charnokitoids of the first Pongomnavolok massif	750–885	6,10–8,25
Двупироксеновые кварцевые диориты второго Поньгомнаволоцкого массива Bipyroxene quartz diorites of the second Pongomnavolok massif	750–819	6,50–7,50
Двупироксеновые гранодиориты второго Поньгомнаволоцкого массива Bipyroxene granodiorites of the second Pongomnavolok massif	750–802	6,60–7,90 min 6,10–6,30
Габброиды – двупироксеновые кварцевые диориты – гранодиориты второго Поньгомнаволоцкого массива Gabbroic rocks – bipyroxene quartz diorites – granodiorites of the second Pongomnavolok massif	750–819	6,50–7,90

Примечание. РТ-параметры определены по компьютерным программам: TPF-2004 (все породы) и TWQ (основные гранулиты и эндербиты первого Поньгомнаволоцкого массива). Для получения результивных РТ-параметров (программа TPF-2004) применялись **геотермометры: Срх – Орх** – [Henry, Medaris, 1976; Wells, 1977; Перчук, 1977; Powell, 1978; Курепин, 1979; Kretz, 1982; Фонарев, Графчиков, 1982; Славинский, 1983]; **Hbl – Срх** – [Плюснина, 1986]; **Hbl – PI** – [Spear, 1981; Jaques et al., 1982]; **PI – Hbl – Qtz** – [Blundy, Holland, 1990]; **Bt – Орх** – [Sengupta et al., 1990] и **геобарометры: Hbl** – [Hollister et al., 1987; Blundy, Holland, 1990; Schmidt, 1991].

Note. PT-parameters were estimated using TPF-2004 (all rocks) and TWQ computer programs (mafic granulites and enderbites of the first Pongomnavolok massif). To obtain resulting PT-parameters (program TPF-2004), **geothermometers: Срх – Орх** – [Henry, Medaris, 1976; Wells, 1977; Perchuk, 1977; Powell, 1978; Kurepin, 1979; Kretz, 1982; Fonarev, Grafchikov, 1982; Slavinskij, 1983]; **Hbl – Срх** – [Pljusnina, 1986]; **Hbl – PI** – [Spear, 1981; Jaques et al., 1982]; **PI – Hbl – Qtz** – [Blundy, Holland, 1990]; **Bt – Орх** – [Sengupta et al., 1990] and **geobarometers: Hbl** – [Hollister et al., 1987; Blundy, Holland, 1990; Schmidt, 1991] were used.

(табл. 6, № 2 и 4, пр. 2-1-26 и пр. 2-1-30; рис. 3, б, в, и 8) гранулитового метаморфизма. РТ-параметры (TWQ) образования каждого из них оценивались по реакциям с учетом пироксеновых, амфиболовых, плагиоклазовых миналов, а также αQtz и H₂O (табл. 6). Точки пересечений линий постоянного состава минералов соответствуют в пробах 2-1-21 и 2-1-26: T = 765 и 819 °C и P = 7,40 и 7,72 кбар (табл. 6, № 1 и 2; рис. 3, б, и 9, а, б). При определении температур и давлений по программе TPF, с использованием этих же минералов, получены сопоставимые с TWQ значения P (7,2–7,4 и 7,2–7,5 кбар) по трем Hbl геобарометрам (табл. 6, № 1 и 2, пр. 2-1-21 и 2-1-26); а также T = 758 и 845 °C, определенные по Срх – Орх-геотермометрам

[Wells, 1977, Kretz, 1982]. Приведенные величины, как в этом случае, так и в других, обычно входят в более широкие пределы значений температурных колебаний (табл. 6, № 1 и 2).

Подобные сравнения РТ-параметров в этом же образце (2-1), но с другой парой (I → II) парагенетических ассоциаций выявили практически ту же закономерность (табл. 6, № 3 и 4, пр. 2-1-22 и 2-1-30; рис. 3, в, и 9, в, г). Парагенезис I формируется (TWQ) при T = 785 °C и P = 7,46 кбар, II – T = 811 °C и P = 6,75 кбар. К данным значениям температуры наиболее близки (TPF): T (I) = 758 °C и (II) = 808 °C [Kretz, 1982]. Величины давлений (TWQ) незначительно превышают значения P (TPF) на 0,2 (I) и 0,6 (II) кбар (табл. 6, № 3 и 4).

Таблица 6. TPF-TWQ – PT-параметры формирования основных гранулитов Поньгомнаволоцкого ГЭЧ-комплекса

Table 6. TPF-TWQ – PT-parameters of the formation of mafic granulites in the Pongomnavolok GEC complex

№ п/п № in order	Номера образцов (TPF), проб (TWQ), парагенезисы Numbers of specimens (TPF), samples (TWQ), parageneses	TPF		TWQ		
		Т °С геотермометры geothermometers	Р, кбар геобарометры Р, kbar, geobarometers	Т °С	Р, кбар P, kbar	Уравнения реакций The equations of reactions
1	2–1 (пр. (sam.) 2-1-21) (I) 2 Орх (En) ₄₃ + 3Срх (Di) ₃₂ + 4Аmp (Prg) ₄₂ ^{1.42} + 15Pl (Anz) ₃₇	3Срх – 2Орх 841 [Wells, 1977]; 836 [Курепин (Kurepin), 1979] 758, 884 [Kretz, 1982]	4Hbl 7,40 [Hollister et al., 1987]; 7,20 [Blundy, Holland, 1990]; 7,20 [Schmidt, 1991]	765	7,40	(1), (16), (17), (18)
2	2–1 (пр. (sam.) 2-1-26) (II) 18 Орх (En) ₄₃ + 6Срх (Aug) ₃₃ + 10Аmp (Prg) ₄₂ ^{1.79} + 15Pl (Anz) ₃₇	6Срх – 18Орх 845 [Wells, 1977]; 906 [Курепин (Kurepin), 1979]; 877 [Kretz, 1982]; 755 [Фонарев, Графчиков (Fonarev, Grafchikov), 1982] 757 [Славинский (Slavinskij), 1983]	10Hbl 7,50 [Hollister et al., 1987]; 7,30 [Blundy, Holland, 1990]; 7,20 [Schmidt, 1991]	819	7,72	(3), (6), (10), (19), (20)
3	2–1 (пр. (sam.) 2-1-22) (I) 38 Орх (En) ₄₂ + 3Срх (Di) ₃₂ + 22Аmp (Prg) ₃₉ ^{1.60} + 45Pl (Anz) ₃₃	3Срх – 38Орх 834 [Wells, 1977]; 844 [Курепин (Kurepin), 1979] 758, 891 [Kretz, 1982]	22Hbl 7,30 [Hollister et al., 1987]; 7,20 [Blundy, Holland, 1990]; 7,10 [Schmidt, 1991]	785	7,46	(1), (4), (5), (14), (15)
4	2–1 (пр. (sam.) 2-1-30) (II) 21 Орх (En) ₄₄ + 28Срх (Di) ₃₁ + 32Аmp (Prg) ₃₉ ^{1.65} + 45Pl (Anz) ₃₃	28Срх – 21Орх 817 [Wells, 1977]; 750 [Курепин (Kurepin), 1979] 808 [Kretz, 1982]	32Hbl 6,20 [Hollister et al., 1987]; 6,20 [Blundy, Holland, 1990]; 6,10 [Schmidt, 1991]	811	6,75	(2), (7), (8), (9), (11), (12), (13), (21)

Примечание. 1–4 – основные гранулиты: (обр. 2–1) – мелкозернистые (1 и 3) двупироксен-амфиболовые кристаллические сланцы (I гранулитовый этап), переходящие (II гранулитовый этап) в среднезернистые (2 и 4) двупироксен-амфиболовые кристаллические сланцы. В парагенезисах и в названиях геотермометров – геобарометров перед символом минералов арабскими цифрами указаны номера точек их микрозондовых анализов. Уравнения минеральных реакций, используемых при определении PT-параметров (TWQ): 2Fe-Ts + 3En = 3Fs + 2Ts (1); 5Fs + 14αQtz + 4Prg = 2Fe-Ts + 4Hd + 8En + 4Ab + 2H₂O (2); 3Ab + 3Di + 4Fe-Ts = 3Fe-Prg + Ts + 9αQtz + 3An (3); 2Ca-Ts + 8αQtz + 2Prg = 2Wo + 2Ts + En + 2Ab (4); 10Ca-Ts + 6Di + 6Jd + 8Fe-Ts = 6Fe-Prg + 3En + 20An + 2H₂O (5); 3Fs + 6Jd + 8Ts + 6Wo = 6Prg + 2Fe-Ts + 18αQtz + 6Ca-Ts (6); 4Wo + 4Ts + 4Jd + 2Fs = 4Ca-Ts + 12αQtz + 3Prg + Fe-Prg (7); 6Jd + 2Hd + 3Fs + 2Ca-Ts + 2H₂O = 4Ab + 2Fe-Prg (8); 6Jd + 3En + 2Di + 2Ca-Ts + 2H₂O = 4Ab + 2Prg (9); 6Jd + 2Hd + 4En + 2Ca-Ts + 2H₂O = 4Ab + Fs + 2Prg (10); 4Ts + 8Jd + 6Fs + 8Di + 4H₂O = 20αQtz + 5Prg + 3Fe-Prg (11); 5Ca-Ts + 6Di + 2Fs + Jd + 3H₂O = 5Wo + Fe-Prg + 2Ts (12); 2Ab + 6Ca-Ts + 8Di + 2Fe-Ts = 6Wo + 2Prg + 3Fs + 8An (13); 6Prg + 2Fe-Ts + 24αQtz + 6Ca-Ts = 6Ab + 3Fs + 8Ts + 6Wo (14); 2Prg + 8αQtz + 3Fs + 2Ca-Ts = 2Ab + 4En + 2Fe-Ts + 2Wo (15); Ab + 4Ts + 2Fe-Prg + Wo = 3Prg + 4Fs + 7An + 3H₂O (16); 10Di + 3En + 4Jd + 2Fe-Ts + 2H₂O = 4Prg + 10αQtz + 6Hd (17); 10Di + 3Fs + 4Jd + 2Ts + 2H₂O = 4Prg + 10αQtz + 6Hd (18); 2Wo + 2Ts + 6Jd + En = 4Ab + 2An + 2Prg (19); 12Wo + 16Fe-Ts + 42Jd + 15En + 6H₂O = 30Ab + 10Ts + 12Fe-Prg (20); 12Wo + 16Ts + 42Jd + 15Fs + 6H₂O = 30Ab + 10Fe-Ts + 12Prg (21).

Note. 1–4 – mafic granulites: (sample 2–1) – fine-grained (1 and 3) bipyroxene-amphibole crystalline schists (granulite stage I) passing into (granulite stage II) medium-grained (2 and 4) bipyroxene-amphibole crystalline schists. In parageneses and in the names of geothermometers- geobarometers Arabic figures, preceding the mineral symbol, show the numbers of points of their microprobe analyses. The equations of mineral reactions used for estimating PT-parameters (TWQ) see above.

рис. 8). Парагенезисы (I) эндербитов – двупироксеновых кварцевых диоритов с гранулитовым амфиболом первого Поньгомнаволоцкого массива сформировались при T = 755–835 °C и P = 7,30–8,10 кбар (табл. 5, рис. 8). Приведенные PT-параметры как супракрустальных, так и интрузивных образований характеризуют второй период I гранулитового этапа метаморфической эволюции ГЭЧ-комплекса.

На II гранулитовом этапе поздняя изофациальная перекристаллизация основных гра-

нулитов с образованием их среднезернистых разновидностей осуществлялась в пределах T = 750–885 °C и P = 6,10–8,25 кбар (табл. 5, рис. 8). Парагенезисы (II) реметаморфизованных эндербитов – чарнокитидов первого Поньгомнаволоцкого массива сформировались при T = 750–875 °C и P = 6,20–8,17 кбар, ед. max 8,43 кбар (табл. 5, рис. 8).

Исследования показали, что режим температур и давлений при реметаморфизме основ-

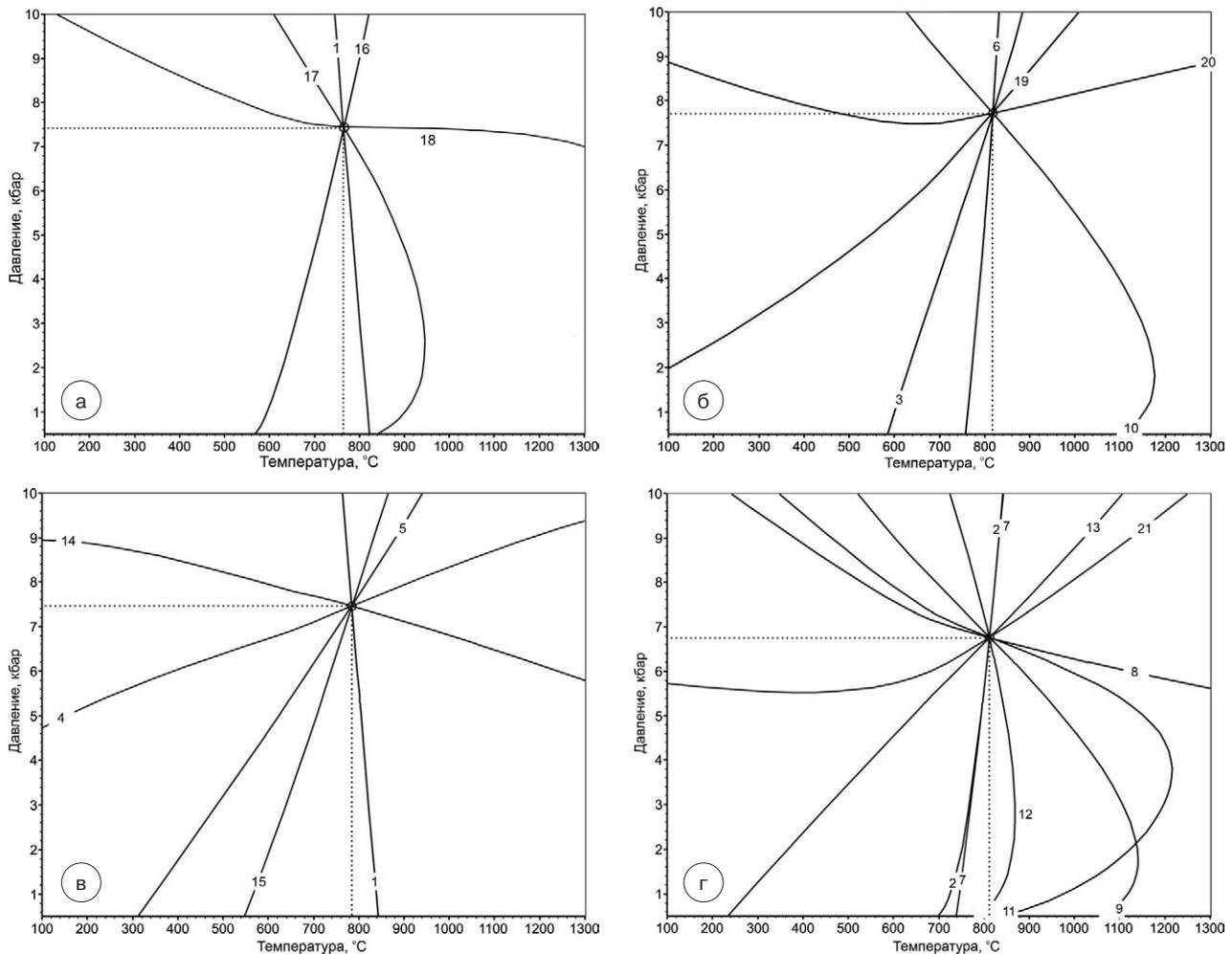


Рис. 9. PT-диаграммы линий постоянного состава минералов изученных (TWQ) образцов основных гранулитов Поньгомнаволоцкого ГЭЧ-комплекса:

(а, в) – мелкозернистые двупироксен-амфиболовые кристаллические сланцы (I гранулитовый этап), переходящие в среднезернистые (б, г) двупироксен-амфиболовые кристаллические сланцы (II гранулитовый этап). Обр. 2–1: пробы 2-1-21 (а) → 2-1-26 (б); 2-1-22 (в) → 2-1-30 (г).

Координаты точек пересечения соответствуют PT-условиям пика гранулитового метаморфизма соответствующих пород. Номера реакций и проб приведены в табл. 6.

Fig. 9. PT-diagrams of the lines of the permanent composition of the minerals of (TWQ) mafic granulite samples from the Pongomnavolok GEC complex:

(а, в) – fine-grained bipyroxene-amphibole schists (granulite stage I) passing into medium-grained (б, г) bipyroxene-amphibole crystalline schists (granulite stage II). Specimen 2–1: samples 2-1-21 (а) → 2-1-26 (б); 2-1-22 (в) → 2-1-30 (г).

The coordinates of the intersection points correspond with the PT-conditions of the peak of granulite-facies metamorphism of corresponding rocks. The numbers of reactions and samples are given in Table 6.

ных гранулитов практически не изменяется. В эндербитах первого Поньгомнаволоцкого массива поздняя изофаціальная перекристаллизация осуществляется при более широких колебаниях PT-параметров по отношению к таковым I гранулитового этапа.

Второй Поньгомнаволоцкий массив, особенности метаморфической эволюции

Изучение пород второго Поньгомнаволоцкого массива в аспекте общей метаморфической

эволюции с супракустальными и интрузивными гранулитовыми образованиями, описанными выше, оставляет больше вопросов, чем ответов. Как было отмечено во введении, по геохронологическим данным и геологическим соотношениям интрузивные образования второго массива более поздние по отношению к эндербитам – чарнокитоидам первого. Внедрение интрузии (II) габброидов – габбродиоритов – двупироксеновых кварцевых диоритов – гранодиоритов (табл. 1) происходило, по-видимому, в условиях гранулитовой фации

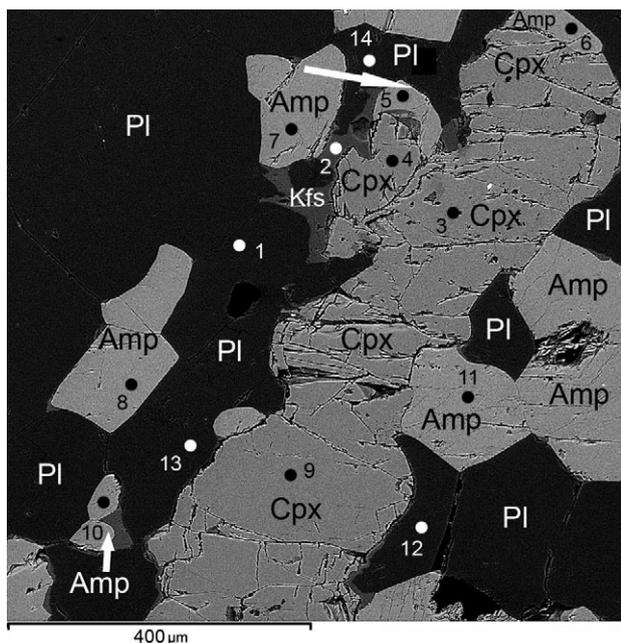


Рис. 10. Равновесные соотношения моноклинного пироксена Cpx (Di) и кальциевого амфибола Amp (Fe-Prg) в двупироксеновых кварцевых диоритах второго Поньгомнаволоцкого массива. Шлиф В-26

Fig. 10. Equiponderous correlations of clinopyroxene – Cpx (Di) and calcium amphibole – Amp (Fe-Prg) in bipyroxene quartz diorites of Pongomnavolok massif II. Thin section В-26

метаморфизма. На это указывают прежде всего петрографические исследования – находки реликтовых гранулитовых минералов среди диафорических. Степень диафореза во втором массиве выше, чем в первом, и единичные реликты ромбических пироксенов встречаются в шлифах крайне редко. При детальном наблюдении из ранних минералов магматических или гранулитовых парагенезисов второго массива были изучены только моноклинные пироксены, кальциевые амфиболы (рис. 6, 7, 10) и биотиты. В породах отсутствуют признаки поздней изофациальной перекристаллизации минералов, что не позволяет выделить два гранулитовых этапа метаморфической эволюции. Исследованы средние и кислые разновидности пород (табл. 1 и 5). На гранулитовом этапе двупироксеновые кварцевые диориты (обр. 12–4, В-26) преимущественно нормального, редко субщелочного ряда представлены: Орх + Cpx (Di_{39–46}, Aug_{39–47})_{39–47} + Amp (Fe-Prg_{56–57}^{1,61–2,19}, Hs_{57–61}^{1,71–2,30})_{56–61} + Bt_{48–57}^{5,15–5,96} + Pl (Olg)_{17–23} + Qtz, ± Kfs (Or)_{1,00–0,92}-парагенезисами, а пироксеновые гранодиориты (обр. 14–5, 14–6) – Орх + Cpx + Amp (Fe-Prg_{54–60}^{1,94–2,63}, Hs₆₁^{2,12})_{54–61}^{1,94–2,63} + Bt_{48–56}^{5,26–6,27} + Pl (Olg)_{18–28} + Kfs (Or)_{0,95–0,90} + Qtz. Данные минеральные парагенетические ас-

социации, судя по наличию кальциевых амфиболов и биотитов, скорее не являются магматическими, а характеризуют заключительный период гранулитового этапа, предшествующий диафорезу. Становление парагенезисов изученных пород происходило при (ТрФ-2004) T = 750–819 °C, P = 6,50–7,50 кбар и 750–802 °C, P = 6,60–7,90 кбар с единичным минимумом 6,10–6,30 кбар (табл. 5).

Моноклинные пироксены, кальциевые амфиболы (Fe-Prg, Hs) и биотиты двупироксеновых кварцевых диоритов (толеитовая серия) второго Поньгомнаволоцкого массива (рис. 6, 7) являются более железистыми (см. парагенезис) по отношению к подобным минералам из аналогичных пород известково-щелочной серии первого массива (обр. 1–5, 2–10): Cpx (Di_{24–33}, Aug_{27–33})_{24–33}, Amp (Prg_{41–48}^{1,75–1,99}, Mg-Hs₄₅^{1,92–1,93})_{41–48}^{1,75–1,99}, Bt_{38–39}^{5,37–5,88}. В амфиболах (Fe-Prg, Hs) и биотитах из пироксеновых гранодиоритов второго массива (обр. 14–5) железистость выше (рис. 7), чем в Amp (Prg_{40–42}^{1,68–1,96}, Mg-Hs_{40–43}^{1,52–1,90})_{40–43} и Bt₂₈^{5,40} из черноэндербитов первого массива (обр. 2–8). В эндербитах кварцеводиоритового ряда увеличивается значение F (64,33–71,97 % → 74,73–78,51 %) от первого ко второму массиву (табл. 1). РТ-параметры становления эндербитов – чернокитоидов первого Поньгомнаволоцкого массива на II гранулитовом этапе составляют T = 750–875 °C, P = 6,20–8,17 кбар (табл. 5, рис. 8). Формирование второго Поньгомнаволоцкого массива осуществлялось (табл. 5, рис. 8) при достаточно близких к предыдущим температурах (750–819 °C) и давлениях (6,50–7,90 кбар).

В целом габброиды – габбро-диориты – двупироксеновые кварцевые диориты – двупироксеновые (?) гранодиориты второго Поньгомнаволоцкого массива отличаются от одноименных средних-кислых пород первого массива по геологическим и геохронологическим данным (являются более поздними) и существованием единственного гранулитового этапа в метаморфической эволюции. А также – повышенной железистостью гранулитовых минералов (Cpx, Amp_{Ca}, Bt), присутствием автолитов кварцеводиоритового состава. При этом в обоих массивах РТ-параметры формирования гранулитовых парагенезисов близки.

На данной стадии исследований очевидно, что время внедрения, становление второго Поньгомнаволоцкого массива, по составу отвечающего габброидам – двупироксеновым: диоритам – гранодиоритам, требует дополнительного изучения и осмысления.

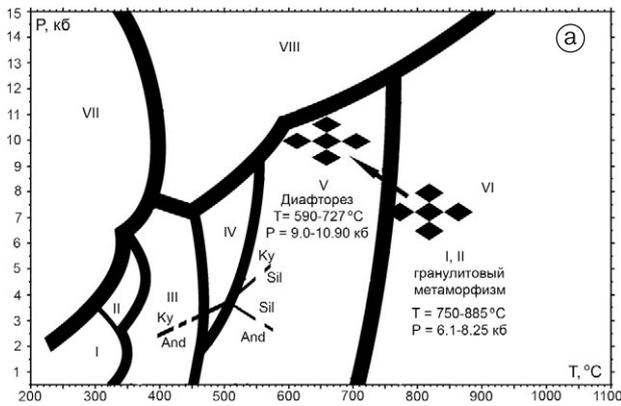


Рис. 11. РТ-параметры метаморфической эволюции Поньгомнаволоцкого ГЭЧ-комплекса на «диаграммах минеральных фаций метаморфических пород»: [Бушмин, Глебовицкий, 2008] (а) и [Cloos, 1993] (б).

Поля фаций метаморфизма: а – эклогитовая (VIII), глаукофансланцевая (VII), гранулитовая (VI), амфиболитовая (V), эпидот-амфиболитовая (IV), зеленосланцевая (III), пумпеллит-актинолитовая (II), цеолитовая или пумпеллит-прениитовая (I); б – эклогитовая (Э), гранулитовая (Гр), амфиболитовая (А). Черной стрелкой на обоих фрагментах показаны переходы РТ-параметров от гранулитового метаморфизма (I, II этапы) к диафторезу [Король, 2015] амфиболитовой фации

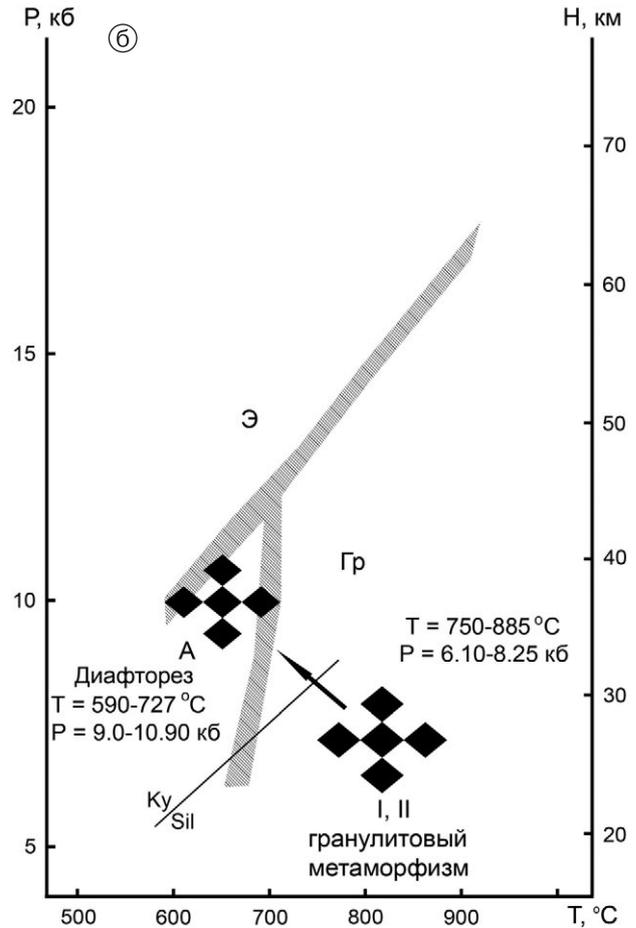
Fig. 11. P-T-parameters of the metamorphic evolution of the Pongomnavolok GEC complex on “diagrams of the mineral facies of metamorphic rocks”...: [Bushmin, Glebovitsky, 2008] (a) and [Cloos, 1993] (b).

Metamorphic facies fields: а – eclogite (VIII), glaucophane-schist (VII), granulite (VI), amphibolite (V), epidote-amphibolite (IV), greenschist (III), pumpellyite-actinolite (II), zeolite or pumpellyite-prenite (I); б – eclogite (Э), granulite (Гр), amphibolite (А). A black arrow in both figures shows the transitions of P-T-parameters from granulite-facies metamorphism (I, II stages) to amphibolite-facies diaphthoresis [Korol, 2015]

Заключение

При геолого-петрологических исследованиях в Поньгомнаволоцком ГЭЧ-комплексе выделяется два гранулитовых этапа метаморфической эволюции, и на I этапе – два периода. В первом из них происходит становление парагенезисов супракрустальных основных гранулитов – мелкозернистых двупироксен-плаггиоклазовых кристаллических сланцев. Второй период характеризуется эндробитовой мигматизацией гранулитового субстрата, внедрением первого Поньгомнаволоцкого массива эндробитов – чарнокитоидов (привнос Na и воды) и гранулитовой амфиболитизацией всех пород. При этом формируются парагенезисы (I) основных мелкозернистых двупироксен-амфибол-плаггиоклазовых кристаллосланцев и амфиболсодержащих эндробитов, реже чарнокитоидов.

На II гранулитовом этапе в Поньгомнаволоцком ГЭЧ-комплексе осуществляется поздняя изофациальная перекристаллизация пород.



Процессы реметаморфизма происходят под воздействием остаточных Na- и K-водных флюидов. В новообразованных парагенезисах (II) – среднезернистых двупироксен-амфиболовых кристаллосланцев и эндробитов – фиксируется небольшое увеличение F в пироксенах, реже в амфиболах, биотитах (для кислых пород), покисление плаггиоклазов. В основных гранулитах образуется Vt. Реметаморфизм представляет собой компенсационную метаморфическую перекристаллизацию с незначительным выносом Mg, привносом щелочей (Na и K) и воды.

РТ-параметры формирования парагенезисов двупироксен-амфиболовых кристаллических сланцев (основных гранулитов) на I и II этапах метаморфической эволюции ГЭЧ-комплекса практически не изменяются: $T = 750-884$ и $750-885$ °C; $P = 6,30-8,00$ и $6,10-8,25$ кбар. В эндробитах – чарнокитоидах первого массива поздняя изофациальная перекристаллизация осуществляется при более широких колебаниях температуры и давления: $T = (I) 755-835$ и (II) $750-875$ °C; $P = (I) 7,30-8,10$ и (II) $6,20-8,17$ кбар. Таким образом, гранулитовые образования Поньгомнаволоцкого ГЭЧ-комплекса на двух этапах метаморфической эволюции сформировались при $T = 750-885$ °C и $P = 6,10-8,25$ кбар (рис. 11).

На III этапе метаморфической эволюции ГЭЧ-комплекса осуществляется диафторез (рис. 11) гранулитовых образований с понижением температуры до 727–590 °С и увеличением давления до 9,00–10,90 кбар в условиях кинитовой – амфиболитовой фации беломорского типа [Король, 2015]. Процессы диафтореза, преобразующие все гранулитовые породы, достаточно многогранны и требуют детального изложения в отдельной статье.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт геологии КарНЦ РАН).

Автор выражает искреннюю благодарность главному научному сотруднику лаборатории геодинамики и геологии докембрия ИГ КарНЦ РАН д. г.-м. н. О. И. Володичеву за предоставленные для микросондовых анализов образцы, консультации и критические замечания во время подготовки статьи.

Литература

- Бушмин В. А., Глебовицкий В. А. Схема минеральных фаций метаморфических пород // Записки РМО. 2008. Ч. СXXXVII, № 2. С. 1–13.
- Володичев О. И. Метаморфизм фации дистеновых гнейсов (на примере беломорского комплекса). Л.: Наука, 1975. 170 с.
- Володичев О. И., Король Н. Е., Кузенко Т. И., Сибелев О. И. Метаморфизм раннедокембрийских комплексов восточной части Фенноскандинавского щита // Геология Карелии от архея до наших дней: Материалы докл. Всерос. конф., посв. 50-летию ИГ КарНЦ РАН (Петрозаводск, 24–26 мая 2011 г.). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 49–55.
- Король Н. Е. Высокотемпературная амфиболитизация при эндербитовой мигматизации основных гранулитов в гранулит-эндербит-чарнокитовых комплексах Карелии // Петрология. 2009. Т. 17, № 4. С. 378–396.
- Король Н. Е. Процессы поздней изофациальной перекристаллизации в гранулит-эндербит-чарнокитовых комплексах Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 14. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 8–32.
- Король Н. Е. Метаморфическая эволюция Поньгомнаволоцкого гранулит-эндербит-чарнокитового комплекса восточной части Беломорского подвижного пояса // Петрография магматических и метаморфических горных пород: Мат-лы XII Всерос. Петрографического совещания с участием зарубежных ученых (Петрозаводск, 15–20 сентября 2015 года). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 434–436.
- Курепин В. А. Термодинамический анализ минеральных равновесий в пироксенсодержащих горных породах // Породообразующие пироксены Украинского щита. Киев: Наукова думка, 1979. С. 115–127.
- Перчук Л. Л. Усовершенствование двупироксенового геотермометра для глубинных перидотитов // ДАН СССР. 1977. Т. 233, № 3. С. 456–459.
- Плюснина Л. П. Экспериментальное исследование равновесия метабазитов, геотермобарометрия // Эксперимент в решении актуальных задач геологии. М.: Наука, 1986. С. 174–183.
- Славинский В. В. Двупироксеновая геотермометрия // Минералогический журнал. 1983. Т. 5, № 6. С. 29–38.
- Степанов В. С., Слабунов А. И. Амфиболиты и карбонатные породы района губы Поньгомы (Белое море) // Докембрий Северной Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1994. С. 6–30.
- Судовиков Н. Г. Геологический очерк Куземо-Поньгомского района // Докл. сов. геологов. МГК. XVII сессия. Северная экскурсия. М.; Л., 1937.
- Фонарев В. И., Графчиков А. А. Двупироксеновый геотермометр // Минералогический журнал. 1982. Т. 4, № 5. С. 3–12.
- Шуркин К. А. Беломорида (геология, петрология, история развития): Автореф. дис. ... докт. геол.-минер. наук. Л., 1964. 43 с.
- Berman R. G. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrologic applications // Canadian Mineralogist. 1991. Vol. 29. P. 833–855.
- Berman R. G., Aranovich L. Y. 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 // Contrib. Mineral. and Petrol. 1996. Vol. 126. P. 1–24.
- Blundy Y. D., Holland T. Y. B. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer // Contrib. Mineral. and Petrol. 1990. Vol. 104, no. 2. P. 208–224.
- 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. Mineral. 1974. Vol. 59, no. 11–12. P. 1203–1208.
- Cebria J. M. PX: A program for pyroxene classification and calculation of end-members // Amer. Mineral. 1990. Vol. 75. P. 1426–1427.
- Cloos M. Litospheric buoyancy and collisional orogenesis: subduction of oceanic plateaus, continental margins, island areas, spreading ridges and seamounts // Geol. Soc. Amer. Bull. 1993. Vol. 105, no. 6. P. 715–737.
- Henry D. J., Medaris L. G. Application of pyroxene and olivine-spinel geothermometers to the alpine peridotites in Southwestern Oregon // Geol. Soc. Amer. Abstr. with Programs. 1976. Vol. 8. P. 913–914.
- Hollister L. S., Grissom G. C., Peters E. K., Stowell H. H., Sisson V. B. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons // Amer. Mineral. 1987. Vol. 72, no. 3–4. P. 231–239.
- Jaques A. L., Blake D. H., Donchak P. J. T. Regional metamorphism in the Selwyn Range area, north-west Queensland // BMR J. Austr. Geol. Geophys. 1982. Vol. 7, no. 3. P. 181–196.

Kretz R. Transfer and exchange equilibria in a portion of the pyroxene quadrilateral as deduced from natural and experimental data // *Geochim. Cosmoch. Acta*. 1982. Vol. 46, no. 3. P. 411–421.

Kretz R. Symbols for rock-forming minerals // *Amer. Mineral.* 1983. Vol. 68, no. 1/2. P. 277–279.

Leake B. E., Woolley A. R., Arps C. E. S., Birch W. D., Gilbert M. C., Grice J. D., Hawthorne E., Kato A., Kisch H. J., Krivovichev V. G., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Nickel E. H., Rock N. M. S., Schumacher J. C., Smith D. C., Stephenson N. C. N., Ungaretti L., Whittaker E. J. W., Youzhi G. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names // *Eur. J. Mineral.* 1997. Vol. 9, no. 3. P. 623–651.

Morimoto N. Nomenclature of pyroxenes // *Mineral. Mag.* 1988. Vol. 52, no. 4. P. 535–550.

Powell R. The thermodynamics of pyroxene geotherms // *Phil. Trans. R. Soc. London*. 1978. Vol. 288. P. 457–469.

Schmidt M. W. Amphibole composition as a function of buffer assemblage and pressure: an experimental approach // *EOS, Transactions, American Geophysical Union. AGU Fall Meeting*. 1991. Vol. 72, no. 44. 547 p.

Schumacher J. C. The estimation of ferric iron in electron microprobe analysis of amphiboles // *No-*

menclature of amphiboles // *Eur. J. Mineral.* 1997. Vol. 9, no. 3. P. 643–651.

Sengupta P., Dasgupta S., Bhattacharya P. K., Mukherjee M. An orthopyroxene – biotite geothermometer and its application in crustal granulites and mantle-derived rocks // *J. Metamorphic Geol.* 1990. Vol. 8, no. 2. P. 191–197.

Spear F. S. Amphibole-plagioclase equilibria: a empirical model for the relation albite + tremolite = edenite + quartz // *Contrib. Mineral. and Petrol.* 1981. Vol. 77, no. 4. P. 355–364.

Volodichev O. I. Evolution of metamorphic processes in the Belomorian mobile belt // *Precambrian high-grade mobile belts. Extended abstracts. Petrozavodsk: KarRC RAS*, 2014. P. 115–116.

Wells P. R. A. Pyroxene thermometry in simple and complex system // *Contrib. Mineral. and Petrol.* 1977. Vol. 62. P. 129–139.

Zinger T. F., Götze J., Levchenkov O. A., Shuleshko I. K., Yakovleva S. Z., Makeyev A. F. Zircon in polydeformed and metamorphosed precambrian granitoids from the White sea tectonic zone, Russia: morphology, cathodoluminescence, and U-Pb chronology // *Int. Geol. Rev.* 1996. Vol. 38. P. 57–73.

Поступила в редакцию 03.04.2017

References

Bushmin V. A., Glebovitskii V. A. Skhema mineral'nykh fatsii metamorficheskikh porod [The scheme of mineral facies of metamorphic rocks]. *Zapiski RMO* [Proceed. Russ. Mineralogical Society]. 2008. Part. CXXXVII, no. 2. P. 1–13.

Fonarev V. I., Grafchikov A. A. Dvupiroksenovyi geotermometr [Two-pyroxene geothermometer]. *Mineralogicheskii zhurnal* [Mineralogical J.]. 1982. Vol. 4, no. 5. P. 3–12.

Korol' N. E. Vysokotemperaturnaya amfibolizatsiya pri enderbitovoi migmatizatsii osnovnykh granulitov v granulit-enderbit-charnokitovykh kompleksakh Karelii [High-temperature amphibolization synchronous with enderbite migmatization of mafic granulites in granulite – enderbite – charnockite complexes in Karelia]. *Petrologiya* [Petrology]. 2009. Vol. 17, no. 4. P. 378–396.

Korol' N. E. Protsessy pozdnei izofatsial'noi perekristallizatsii v granulit-enderbit-charnokitovykh kompleksakh Karelii [Late isofacial recrystallization processes in granulite-enderbite-charnockite complexes in Karelia]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii* [Geol. Mineral Res. Karelia]. Iss. 14. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2011. P. 8–32.

Korol' N. E. Metamorficheskaya evolyutsiya Pon'gomnavolokskogo granulit-enderbit-charnokitovogo kompleksa vostochnoi chasti Belomorskogo podvzhnogo poyasa [Metamorphic evolution of the Pongomnavolok granulite-enderbite-charnockite complex in the eastern part of the White Sea Mobile Belt]. *Petrografiya magmaticheskikh i metamorficheskikh gornykh porod: Materialy XII Vserossiiskogo Petrograficheskogo*

soveshchaniya s uchastiem zarubezhnykh uchenykh. Petrozavodsk, 15–20 sentyabrya 2015 g. [Petrography of Igneous and Metamorphic Rocks: Proceed. XII All-Russ. Petrographic Meeting with Int. Part. (Petrozavodsk, September 15–20, 2015)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. P. 434–436.

Kurepin V. A. Termodinamicheskii analiz mineral'nykh ravnovesii v piroksensoderzhashchikh gornykh porodakh [Thermodynamic analysis of mineral equilibria in pyroxene rocks]. *Porodoobrazuyushchie pirokseny Ukrainского shchita* [Rock-forming Pyroxenes Ukrainian Shield]. Kiev: Naukova dumka, 1979. P. 115–127.

Perchuk L. L. Uovershenstvovanie dvupiroksenovogo geotermometra dlya glubinykh peridotitov [Modification of two-pyroxene geothermometer for deep-seated peridotites]. *DAN SSSR* [Dokl. Earth. Sci.]. 1977. Vol. 233, no. 3. P. 456–459.

Plyusnina L. P. Eksperimental'noe issledovanie ravnovesiya metabazitov, geotermobarometriya [Experimental study on metabasite equilibria, geothermobarometry]. *Eksperiment v reshenii aktual'nykh zadach geologii* [Experiment in the Solution of Topical Problems of Geology]. Moscow: Nauka, 1986. P. 174–183.

Slavinskii V. V. Dvupiroksenovaya geotermometriya [Two-pyroxene geothermometry]. *Mineralogicheskii zhurnal* [Mineralogical J.]. 1983. Vol. 5, no. 6. P. 29–38.

Stepanov V. S., Slabunov A. I. Amfibolity i karbonatnye porody raiona guby Pon'gomy (Beloe more) [Amphibolites and carbonate rocks of the Pongoma Bay region, the White Sea]. *Dokembrii Severnoi Karelii* [Precambrian Northern Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 1994. P. 6–30.

Sudovikov N. G. Geologicheskii ocherk Kuzemo-Pon'gorskogo raiona [Geological description of the Kuzema-Pongoma area]. *Dokl. sov. geologov. MGK. XVII sessiya. Severnaya Ekskursiya* [Reports of Soviet Geologists. IGC. XVII Session. Northern Excursion]. Moscow; Leningrad, 1937.

Shurkin K. A. Belomoridy (geologiya, petrologiya, istoriya razvitiya) [Belomorides geology, petrology, history of development]: Summary of PhD (Dr. of Chem.) thesis. Leningrad, 1964. 43 p.

Volodichev O. I. Metamorfizm fatsii distenovykh gneisov na primere belomorskogo kompleksa [Metamorphism of the kyanite gneisses facies (the case of the Belomorian complex)]. Leningrad: Nauka, 1975. 170 p.

Volodichev O. I., Korol' N. E., Kuzenko T. I., Sibelev O. I. Metamorfizm rannedokembriiskikh kompleksov vostochnoi chasti Fennoskandinavskogo shchita [Metamorphism of the Early Precambrian complexes in the eastern Fennoscandian Shield]. *Geologiya Karelii ot arkheya do nashikh dnei: Materialy dokladov Vserossiiskoi konferentsii, posvyashhennoi 50-letiyu IG KarRC RAS (Petrozavodsk, 24–26 maya 2011 g.)* [Geology of Karelia from the Archaean to the present: Proceed. All-Russ. Conf. Dedicated 50th Anniv. IG KarRC RAS (Petrozavodsk, May 24–26, 2011)]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2011. P. 49–55.

Berman R. G. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrologic applications. *Canadian Mineralogist*. 1991. Vol. 29. P. 833–855.

Berman R. G., Aranovich L. Y. 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. *Contrib. Mineral. and Petrol.* 1996. Vol. 126. P. 1–24.

Blundy Y. D., Holland T. Y. B. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contrib. Mineral. and Petrol.* 1990. Vol. 104, no. 2. P. 208–224.

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. Mineral.* 1974. Vol. 59, no. 11–12. P. 1203–1208.

Cebria J. M. PX: A program for pyroxene classification and calculation of end-members. *Amer. Mineral.* 1990. Vol. 75. P. 1426–1427.

Cloos M. Litospheric buoyancy and collisional orogenesis: subduction of oceanic plateaus, continental margins, island areas, spreading ridges and seamounts. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1993. Vol. 105, no. 6. P. 715–737.

Henry D. J., Medaris L. G. Application of pyroxene and olivine-spinel geothermometers to the alpine peridotites in Southwestern Oregon. *Geol. Soc. Amer. Abstr. with Programs*. 1976. Vol. 8. P. 913–914.

Hollister L. S., Grissom G. C., Peters E. K., Stowell H. H., Sisson V. B. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification

of calc-alkaline plutons. *Amer. Mineral.* 1987. Vol. 72, no. 3–4. P. 231–239.

Jaques A. L., Blake D. H., Donchak P. J. T. Regional metamorphism in the Selwyn Range area, north-west Queensland. *BMR J. Aust. Geol. Geophys.* 1982. Vol. 7, no. 3. P. 181–196.

Kretz R. Transfer and exchange equilibria in a portion of the pyroxene quadrilateral as deduced from natural and experimental data. *Geochim. Cosmoch. Acta*. 1982. Vol. 46, no. 3. P. 411–421.

Kretz R. Symbols for rock-forming minerals. *Amer. Mineral.* 1983. Vol. 68, no. 1/2. P. 277–279.

Leake B. E., Woolley A. R., Arps C. E. S., Birch W. D., Gilbert M. C., Grice J. D., Hawthorne E., Kato A., Kisch H. J., Krivovichev V. G., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Nickel E. H., Rock N. M. S., Schumacher J. C., Smith D. C., Stephenson N. C. N., Ungaretti L., Whittaker E. J. W., Youzhi G. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Eur. J. Mineral.* 1997. Vol. 9, no. 3. P. 623–651.

Morimoto N. Nomenclature of pyroxenes. *Mineral. Mag.* 1988. Vol. 52, no. 4. P. 535–550.

Powell R. The thermodynamics of pyroxene geotherms. *Phil. Trans. R. Soc. London*. 1978. Vol. 288. P. 457–469.

Schmidt M. W. Amphibole composition as a function of buffer assemblage and pressure: an experimental approach. *EOS, Transactions, American Geophysical Union. AGU Fall Meeting*. 1991. Vol. 72, no. 44. 547 p.

Schumacher J. C. The estimation of ferric iron in electron microprobe analysis of amphiboles. *Nomenclature of amphiboles. Eur. J. Mineral.* 1997. Vol. 9, no. 3. P. 643–651.

Sengupta P., Dasgupta S., Bhattacharya P. K., Mukherjee M. An orthopyroxene – biotite geothermometer and its application in crustal granulites and mantle-derived rocks. *J. Metamorphic Geol.* 1990. Vol. 8, no. 2. P. 191–197.

Spear F. S. Amphibole-plagioclase equilibria: a empirical model for the relation albite + tremolite = edenite + quartz. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1981. Vol. 77, no. 4. P. 355–364.

Volodichev O. I. Evolution of metamorphic processes in the Belomorian mobile belt. *Precambrian high-grade mobile belts*. Extended abstracts. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2014. P. 115–116.

Wells P. R. A. Pyroxene thermometry in simple and complex system. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1977. Vol. 62. P. 129–139.

Zinger T. F., Götze J., Levchenkov O. A., Shuleshko I. K., Yakovleva S. Z., Makeyev A. F. Zircon in polydeformed and metamorphosed precambrian granulites from the White sea tectonic zone, Russia: morphology, cathodoluminescence, and U-Pb chronology. *Inter. Geol. Rev.* 1996. Vol. 38. P. 57–73.

Received April 03, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Король Наталия Евгеньевна
научный сотрудник, к. г.-м. н.
Институт геологии КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: korol@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 782753

CONTRIBUTOR:

Korol, Nataliya
Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk,
Karelia, Russia
e-mail: korol@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 782753