

УДК 552.163

Минералогия и P-T условия образования амфиболитов няртинского метаморфического комплекса и маньхобеинской свиты Приполярного Урала

К.С. Попвасев

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН

67982, Сыктывкар, ул. Первомайская, 54. E-mail: kspopvasev@geo.komisc.ru

(Статья поступила в редакцию 16 мая 2022 г.)

В статье приведены результаты изучения амфиболитов няртинского метаморфического комплекса и маньхобеинской свиты. По петрографическим и минеральным особенностям пород, химической зональности гранатов установлены два эпизода проявления метаморфизма. Первый эпизод – более высокотемпературный (500–620°C), отвечающий условиям эпидот–амфиболитовой фации (B₃). Давление на этом этапе оценено в 6–10 кбар. Второй эпизод отвечает низкотемпературному диафторезу (284–318°C) в условиях фации зеленых сланцев (B₄). Аналогичные условия метаморфизма пород няртинского комплекса и маньхобеинской свиты подтверждают представление о том, что маньхобеинская свита не является самостоятельным стратиграфическим подразделением, а представляет собой комплекс низкотемпературных диафторитов по породам, аналогичным тем, которыми сложен няртинский комплекс.

Ключевые слова: *P-T условия метаморфизма, няртинский комплекс, амфиболиты, эпидот-амфиболитовая фация.*

DOI: 10.17072/psu.geol.21.3.216

Введение

В северной части Приполярного Урала, в бассейне р. Кожим, вскрывается наиболее полный разрез докембрия-палеозоя Тимано-Североуральского региона. Район достаточно хорошо изучен, однако некоторые вопросы стратиграфии метаморфизованных образований являются спорными. Особенно проблематичным является вопрос о возрасте и стратиграфическом расчленении нижней части докембрийского разреза территории. Остаются неясными объем и возрастные ограничения нижнего докембрия от полного их отрицания до включения в их разрез не только нижнепротерозойского няртинского метаморфического комплекса, залегающего в основании докембрийского разреза Приполярного Урала, но и отложений маньхобеинской свиты, традиционно относящихся к нижнему рифею (Нижний докембрий..., 2010). В то же время некоторые исследователи вовсе отрицают наличие в этом районе нижнедокембрийских образований (Государственная..., 2001). Изучение метаморфизма пород может внести определенную лепту в

расшифровку геологического строения рассматриваемого района.

Геологическая характеристика

Разрез няртинского комплекса (PR₁) представлен гранатсодержащими биотитовыми и двуслюдяными гнейсами и кристаллическими сланцами, переслаивающимися с гранатсодержащими амфиболитами и амфиболсодержащими сланцами. В подчиненном количестве присутствуют редкие и маломощные прослойки кварцитов и мраморов. Вблизи контактов с рифейскими толщами породы комплекса рассланцованы и превращены в низкотемпературные диафториты (Пыстина, Пыстин, 2002). Низкотемпературные диафториты имеют вид хлорит-мусковит-альбит-кварцевых, эпидот-альбит-хлорит-актинолитовых, кальцит-эпидот-хлоритовых сланцев. Общая мощность няртинского комплекса превышает 1200 м. В настоящее время эти образования разделяются на амфиболово-гнейсовую (мощностью более 500 м) и плагио-гнейсово-сланцевую толщи (мощностью более 700 м). Для пород няртинского комплекса был установлен Pb-Pb возраст

«гранулитового» циркона – 2125 ± 25 млн лет, который фиксирует время проявления высоко-температурного метаморфизма, достигавшего уровня гранулитовой фации (Пыстина, Пыстин, 2008). Эти данные позднее были подтверждены локальными U–Pb датировками метаморфогенных цирконов «гранулитового» типа из гнейсов няртинского комплекса. Полученный возраст – 2127 ± 31 млн лет (Пыстина и др., 2019). В то же время при геологическом доизучении площади м–ба 1:200000 листа Q–41–XXV, результатом которого явилась карта, приведенная на рис. 1, возраст няртинской свиты был принят как раннерифейский (Государственная..., 2001).

Маньхобеинская свита (RF₁?) сложена двуслюдяными и мусковитовыми кристаллическими сланцами, переслаивающимися с хлорит-амфиболовыми сланцами и слюдистыми полевошпатовыми кварцитами (Глубинное строение..., 2011). В основании свиты фрагментарно выделяется пачка метаморфизованных грубообломочных пород, интерпретируемых как метаконгломераты, метагравелиты, метапсаммиты. Наиболее полные разрезы таких образований описаны А.В. Цимбалюком по рекам Хобею, Мань-Хобею и Няртаю. По мнению А.М. Пыстина (1994), эти образования имеют катакластическую и диафторическую природу и сформировались за счет кристаллических сланцев и других метаморфических пород няртинского комплекса. То есть предполагается, что маньхобеинская свита как самостоятельное стратиграфическое подразделение выделена ошибочно; на самом деле это низкотемпературные диафториты по породам няртинского комплекса (Пыстин, Пыстина, 2018).

Наличие высокотемпературных метабазитов в разрезе маньхобеинской свиты ставит задачу их сравнения с амфиболитами няртинского комплекса, установления P-T условий метаморфизма пород на новой фактической основе для восстановления целостной картины метаморфических событий и уточнения строения нижней части докембрийского разреза региона. Для решения задачи были изучены минеральные ассоциации метабазитов няртинского комплекса и маньхобеинской свиты.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования для пород няртинского комплекса являются образцы амфиболитов, часть из которых отобрана автором в ходе полевых работ в 2015 г., часть образцов предоставлена научным руководителем А.М. Пыстиным из обнажений переслаивающихся амфиболитов и гнейсов в верховьях р. Кожим и ее притоков: руч. Николай-Шор, Иг-шор, Сергей-Шор (рис. 1). Для изучения метаморфизма пород маньхобеинской свиты образцы отобраны в верховьях р. Кожим на руч. Николай-Шор из реликтовых выходов амфиболитов среди диафторитов (рис. 1).

Структурно-текстурные и петрографические особенности пород изучались в шлифах на поляризационном микроскопе БиОптик СР–400.

Составы минералов определялись в ЦКП «Геонаука» на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Oxford instruments X-Max (аналитик А.С. Шуйский) в аншлифах с углеродным напылением. Стандарты: Si (Si), Ti (Ti), Al (Al₂O₃), Fe (Fe), Mn (Mn), Mg (MgO), Ca (CaF₂), Na (Ab), K (KBr). При оценке термодинамических параметров метаморфизма были использованы Amf–Pl геотермометры (Плюснина, 1983; Ферштатер, 1990), Hbl-гебарометры (Hammarstrom, Zen, 1986; Schmidt, 1991), Grt-Hbl геотермометры (Wells, 1979; Perchuk, 1990, Graham, Powell, 1984; Powell, 1985), представленные в программе PTQuick (<http://www.dimadd.ru/en/Programs/ptquick>). Для определения температуры кристаллизации хлоритов использовались хлоритовые геотермометры (Zang, Fyfe 1995; Kranidiotis, MacLean, 1978). Определение параметров метаморфизма проводилось на основании рассчитанных формул минералов по результатам микрозондового анализа. Расчет кристаллохимических формул амфиболов проводился на 23 атома кислорода, гранатов на 12 атомов, плагиоклазов на 8, хлоритов на 28. Расчет кристаллохимических формул биотитов производился на 22 положительных заряда катионов.

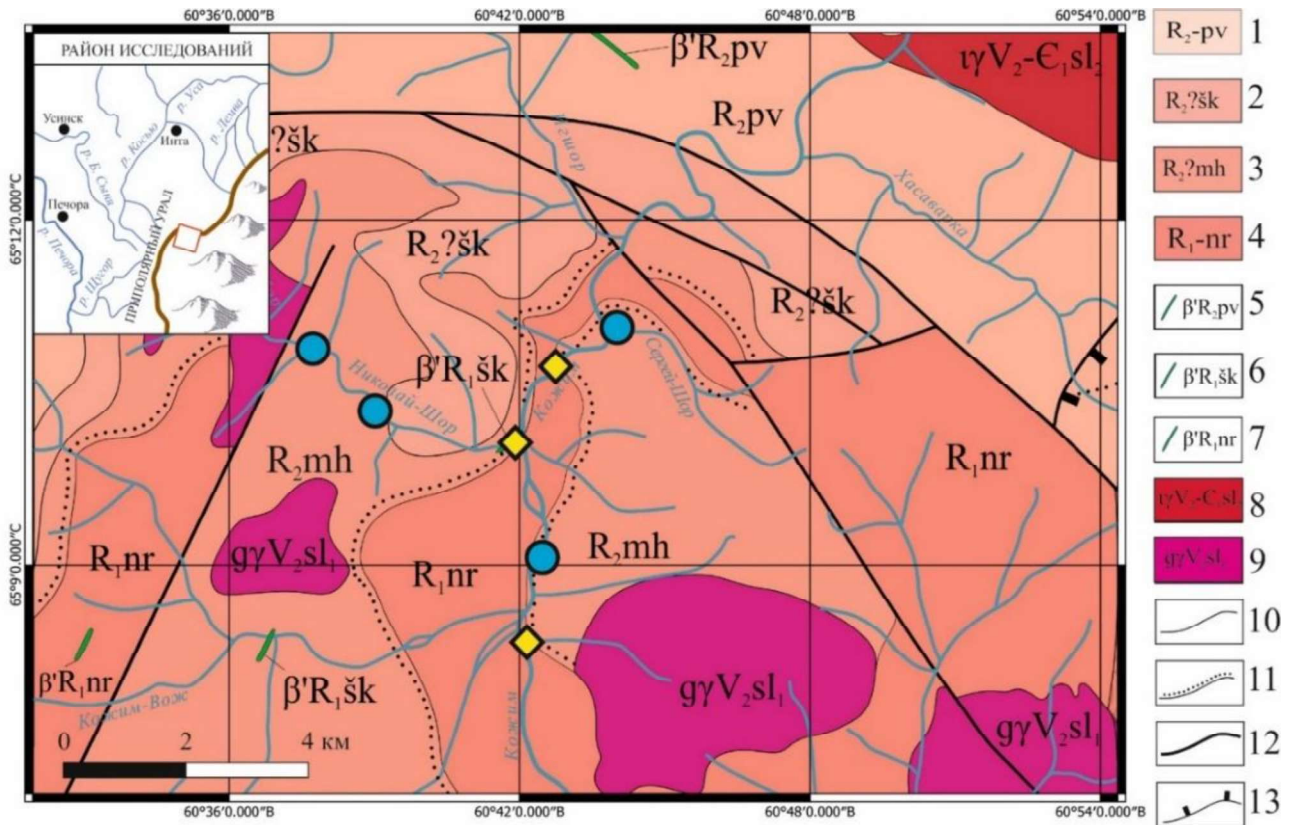


Рис. 1. Фрагмент геологической карты листа Q-41-XXV М-б 1:200000. По (Государственная..., 2001): 1 – пуйвинская свита, 2 – цокурьинская свита, 3 – маньхобейнская свита, 4 – няртинская свита, 5 – пуйвинские субвулканические образования, 6 – цокурьинские субвулканические образования, 7 – няртинские субвулканические образования, 8, 9 – сальнерско-маньхобейнский комплекс гранит-лейкогранитовый (первая, вторая фаза), 10 – достоверные границы между разновозрастными геологическими образованиями и литологическими подразделениями, 11 – достоверные геологические границы несогласного залегания, 12 – разломы, 13 – надвиги. Ромбами указаны точки отбора проб няртинского комплекса, кругами – маньхобейнской свиты

Петрография и минералогия

Минеральный состав амфиболитов няртинского комплекса представлен: амфиболом (40–60%), кварцем (20–25%), плагиоклазом (10–15%) эпидотом (10%), гранатом (менее 5%), хлоритом (единичные знаки). В амфиболитах маньхобейнской свиты отмечаются амфибол (40–50%), кварц (15–25%), гранат (10–15%), плагиоклаз (10%), хлорит (5–10%), биотит (5%), эпидот (единичные знаки). Акцессорные минералы представлены апатитом, титанитом, ильменитом, рутилом и цирконом. По текстурно-структурным признакам амфиболиты няртинского комплекса мелкозернистые, обнаруживают сланцеватую текстуру и нематогранобластовую структуру, обусловленную вытянутым расположением темноцветных минералов (рис. 2 a-d). Среднезернистые амфиболиты маньхобейнской свиты имеют порфиробла-

стовую структуру с лепидонематобластовой структурой основной ткани, и массивную текстуру пород (рис. 2 e, f).

Амфиболы вместе с кварцем и плагиоклазом слагают основную ткань пород. В шлифах амфиболы представлены удлиненно-призматическими и таблитчатыми зернами (рис. 2) с отчетливым плеохроизмом в зеленых и сине-зеленых тонах. Все амфиболы, согласно классификации (Leak et. all, 1997), входят в группу Са-амфиболов. Составы амфиболов (табл. 1) представлены в основном феррочермакитом, в меньшей степени ферропаргаситом, магнезиогорнблендитом, чермакитом и феррогорнблендитом (рис. 3 а, б). Показатель железистости $X_{Fe}^{Amf} = 0,44–0,60$. Для всех амфиболов (56 составов) содержание TiO_2 колеблется в небольших пределах (0,32–0,65 мас. %), MnO (до 0,87 мас. %), Na_2O (1,38–2,47 мас. %), CaO (9,15–11,28 мас. %).

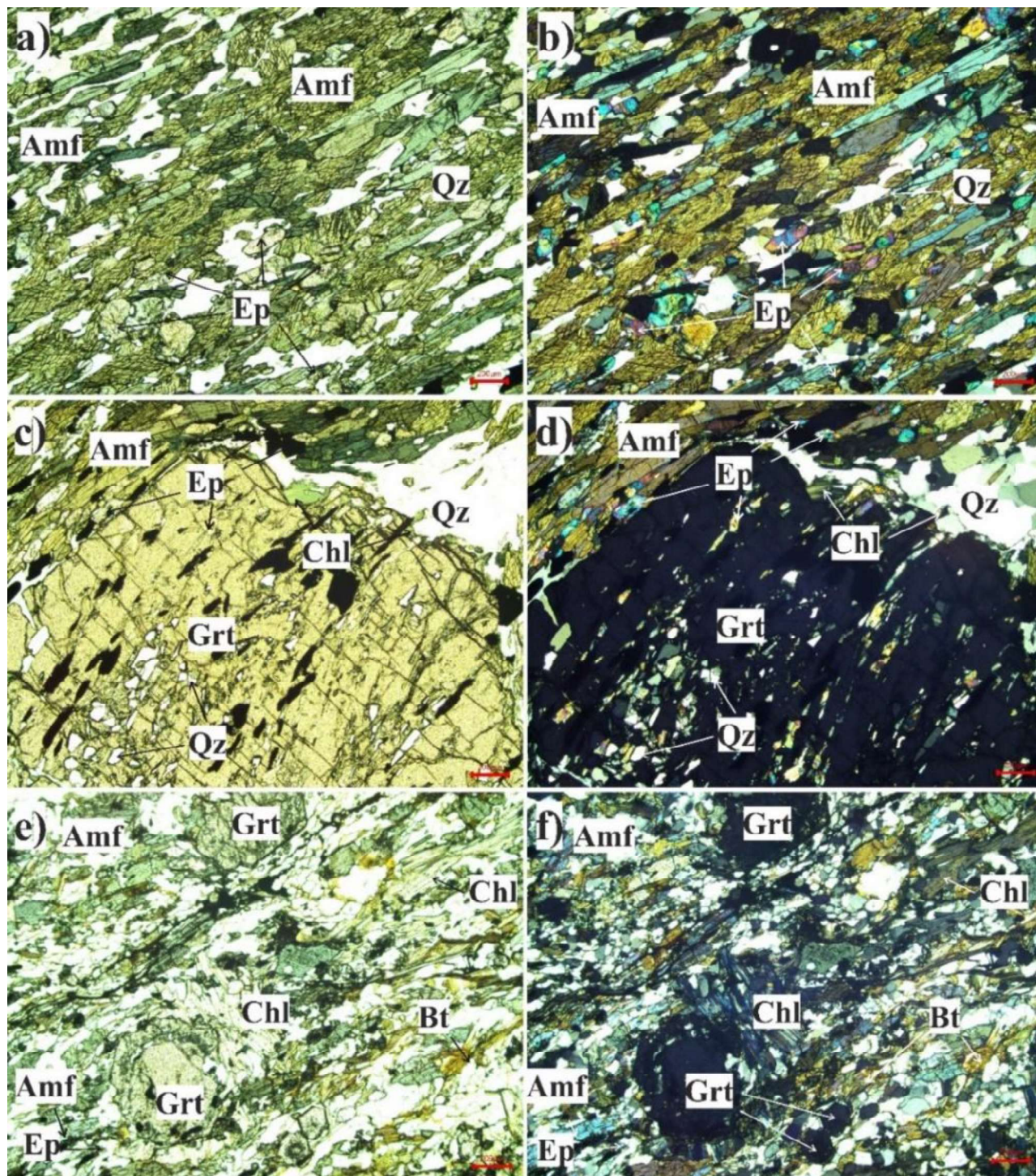


Рис. 2. Микрофотографии шлифов (a,c,e – без анализатора; b,d,f – с анализатором) амфиболитов няртинского комплекса (a–d), амфиболитов маньхобейнской свиты (e,f). Здесь и далее сокращения минералов приняты по (Whitney, Evans, 2010)

Гранаты отмечаются в виде кристаллов неправильной формы, часто содержат включения кварца, амфибола, титанита, ильменита. Крупные зерна разбиты сериями субпараллельных трещин, по которым развиваются биотит и хлорит. Размеры кристаллов варьируют от 0,2 мм до 0,5 см. Химический состав гранатов отвечает гроссуляр-альмандину (рис.

3 с, d). Изменение химического состава от центра к краям (табл. 2) указывает на прямую изохимическую зональность, определяющуюся увеличением альмандинового и пиропового миналов при одновременном уменьшении спессартинового минала и Са-компонента. По усредненным данным (центр – $Alm_{54}Prp_4Sps_{18}Grs_{24}$, край – $Alm_{63}Prp_7Sps_6$

Grs₂₄), повышению железистости, магниальности и снижению спессартина можно сделать вывод о росте гранатов при прогрессивном метаморфизме. По данным О.В. Авченко

(1982), такой тип зональности указывает на рост степени метаморфизма в условиях низких и средних ступеней.

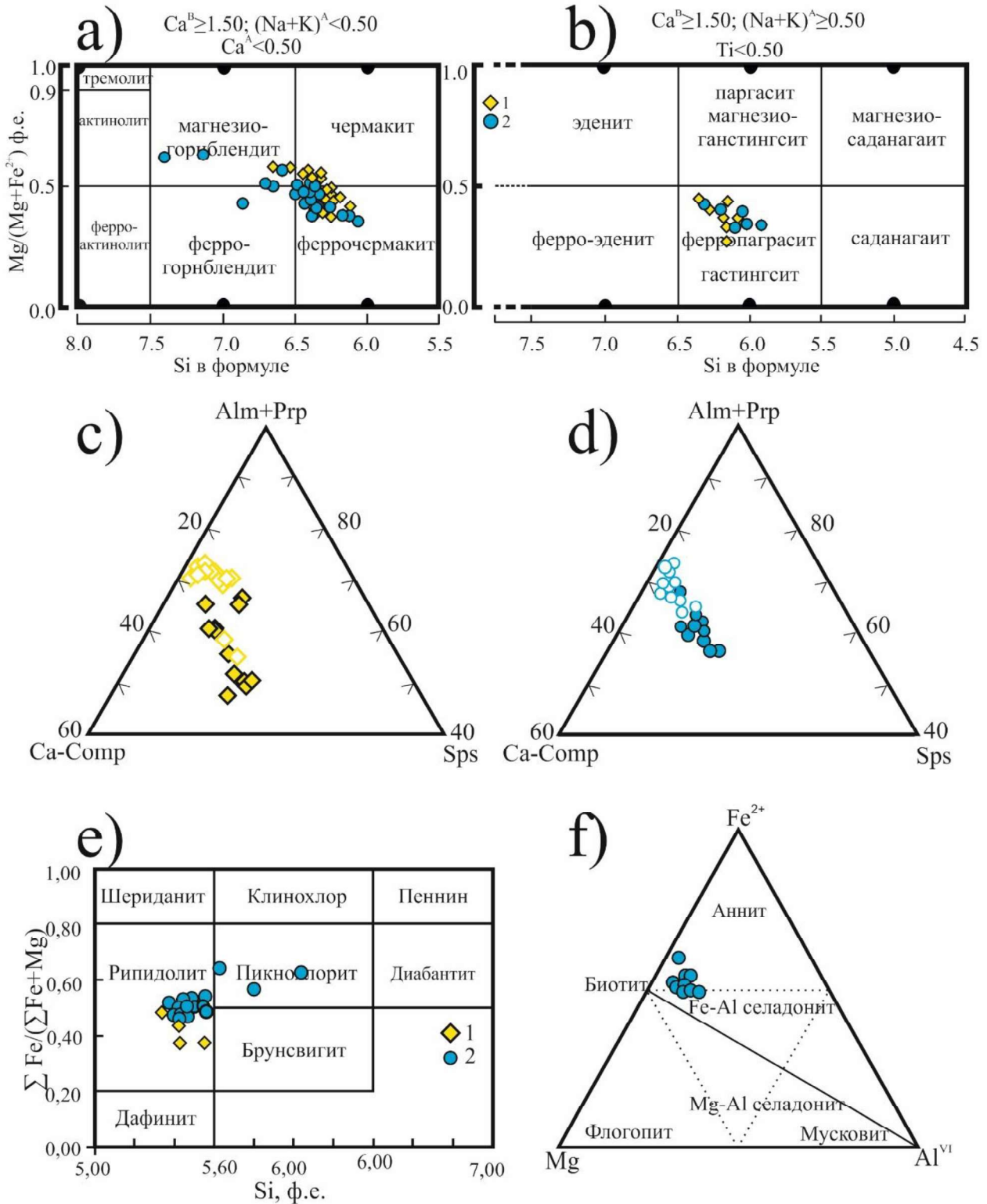


Рис. 3. Диаграммы составов минералов: а, b – вариации химических составов амфиболов (Leak et. all, 1997); с, d – тройная диаграмма минерального состава гранатов из амфиболитов (закрашенные фигуры – центральные части, с цветным абрисом – краевые); е – классификационная диаграмма хлоритов (Heu, 1958); f – слюд (классификационная диаграмма слюд заимствована из работы Васильева и др., 2012): 1 – няртинского комплекса, 2 – маньхобейнской свиты

Таблица 1. Химический состав амфиболов из амфиболитов няртинского комплекса и маньхобеинской свиты. мас % (выборка)

№ образца	Няртинский комплекс						Маньхобеинская свита				
	11	18		228	29		118		1381		1262
Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	42,6	43,05	43,15	44,08	43,63	43,75	42,35	43,91	42,3	42,23	41,31
TiO ₂	0,5	0,52	0,49	0,55	0,43	0,28	0,36	0,36	0,46	0,36	0,41
Al ₂ O ₃	14,61	14,49	14,52	13,79	14,79	14,18	14,11	12,97	16,23	15,95	14,52
FeO _{tot}	17,79	17,54	18	19,36	19,22	19,2	19,17	18,38	19,18	20,19	19,67
MgO	8,36	8,78	8,65	7,72	7,33	7,29	7,13	8,15	6,74	6,43	7,45
MnO	–	0,26	0,25	–	–	–	–	–	–	–	–
CaO	10,07	9,97	9,74	10,26	10,47	9,25	10,98	10,61	10,72	10,52	9,9
Na ₂ O	2,29	2,36	2,48	1,74	1,87	2,04	1,36	1,61	1,76	1,84	2,29
K ₂ O	0,4	0,42	0,39	0,34	0,4	0,4	0,44	0,31	0,63	0,5	0,49
Сумма	96,63	97,38	97,68	97,83	98,13	96,4	95,9	96,29	98,02	98,03	96,23
Количество ионов при пересчете на 23 атома кислорода											
Si	6,35	6,35	6,36	6,5	6,42	6,54	6,44	6,58	6,27	6,28	6,26
Ti	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
Al	2,56	2,52	2,53	2,39	2,57	2,50	2,52	2,29	2,84	2,79	2,6
Fe ²⁺	1,61	1,54	1,6	1,78	1,8	1,88	2,09	2,05	1,9	1,99	1,86
Fe ³⁺	0,6	0,62	0,62	0,61	0,56	0,53	0,35	0,48	0,48	0,52	0,63
Mg	1,86	1,93	1,9	1,7	1,61	1,62	1,62	1,82	1,49	1,42	1,61
Mn	–	0,03	0,03	–	–	–	–	–	–	–	–
Ca	1,61	1,58	1,54	1,62	1,65	1,48	1,79	1,7	1,7	1,67	1,61
Na	0,65	0,67	0,71	0,49	0,54	0,59	0,4	0,47	0,5	0,54	0,67
K	0,1	0,08	0,07	0,06	0,07	0,08	0,09	0,06	0,12	0,09	0,09
Al ^{VI}	0,91	0,87	0,89	0,89	0,99	1,04	0,96	0,87	1,11	1,07	0,86
X _{Fe} ^{Amf}	0,46	0,44	0,46	0,51	0,53	0,54	0,56	0,53	0,56	0,58	0,54

Таблица 2. Химический состав гранатов из амфиболитов няртинского комплекса и маньхобеинской свиты. мас % (выборка)

№ образца	Няртинский комплекс							
	11				18		29	
	1	2	5	6	7	8	9	10
Компонент	ц	к	ц	к	ц	к	ц	к
SiO ₂	37,23	37,23	36,74	37,1	37,31	36,79	36,58	36,82
TiO ₂	–	–	0,18	–	0,19	–	0,22	–
Al ₂ O ₃	20,79	21,27	20,82	21,01	20,43	20,95	20,4	21,07
FeO _{tot}	20,67	27,6	26,92	28,05	22,11	30,27	24,36	33,14
MnO	8,83	3,69	5,89	3,93	8,66	0,93	12,25	2,95
MgO	0,78	2	1,63	1,85	–	1,17	–	2,09
CaO	11,2	7,89	7,26	7,47	9,66	8,77	5,8	3,94
Сумма	99,5	99,67	99,44	99,41	98,46	98,89	99,61	100,01

Таблица 2. Окончание

Количество ионов при пересчете на 12 атомов кислорода								
Si	2,11	2,09	2,09	2,10	2,14	2,09	2,11	2,09
Ti	–	–	0,01	–	0,01	–	0,01	–
Al	3,75	3,8	3,77	3,79	3,74	3,80	3,75	3,80
Fe ²⁺	0,93	1,28	1,24	1,3	1,00	1,41	1,11	1,55
Fe ³⁺	0,04	0,02	0,04	0,03	0,07	0,03	0,07	0,02
Mg	0,06	0,17	0,14	0,15	0,41	0,04	–	0,17
Mn	0,42	0,17	0,28	0,19	0,00	0,10	0,58	0,14
Ca	0,67	0,47	0,86	0,89	0,58	0,52	0,35	0,23
X _{Fe} ^{Grt}	0,94	0,89	0,9	0,9	0,7	1,0	1	0,90
<i>Alm</i>	45	61	60	62	50	68	55	74
<i>Sps</i>	20	8	13	9	21	2	28	7
<i>Prp</i>	3	8	6	7	0	5	0	8
<i>Ca-comp</i>	32	22	20	21	29	25	17	11
№ образца	Маньхобейнская свита							
	1262		1381				118	
Компонент	11	12	13	14	15	16	17	18
	ц	к	ц	к	ц	к	ц	к
SiO ₂	36,48	36,6	36,98	36,73	36,90	37,16	37,56	38,59
TiO ₂	0,26	–	0,14	–	0,14	0,00	0,29	0,00
Al ₂ O ₃	20,36	20,8	20,59	20,86	21,10	21,10	21,24	22,34
FeO _{tot}	25,86	32,5	27,36	28,36	28,04	29,82	25,98	29,61
MnO	8,61	2,6	5,67	3,64	2,51	1,25	4,66	1,71
MgO	1,67	1,84	1,44	1,61	1,56	1,90	1,04	1,78
CaO	5,85	4,51	7,87	7,77	9,06	8,59	10,24	9,43
Сумма	99,09	98,85	100,05	98,97	99,31	99,82	101,02	103,46
Количество ионов при пересчете на 12 атомов кислорода								
Si	2,10	2,10	2,10	2,09	2,08	2,09	2,09	2,08
Ti	0,01	–	0,01	–	0,01	0,00	0,01	0,00
Al	3,74	3,80	3,73	3,79	3,80	3,78	3,77	3,83
Fe ²⁺	1,18	1,52	1,26	1,31	1,32	1,40	1,21	1,33
Fe ³⁺	0,06	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00
Mg	0,14	0,12	0,12	0,13	0,12	0,06	0,22	0,08
Mn	0,41	0,15	0,27	0,17	0,13	0,16	0,09	0,15
Ca	0,35	0,27	0,94	0,93	0,54	0,51	0,61	0,56
X _{Fe} ^{Grt}	0,89	0,93	0,92	0,91	0,93	0,91	0,94	0,87
<i>Alm</i>	57	74	60	63	62	66	57	64
<i>Sps</i>	20	6	13	8	6	3	10	4
<i>Prp</i>	6	7	6	6	6	7	4	7
<i>Ca-comp</i>	17	13	22	22	26	24	29	26

Плагиоклазы с составом от альбита до олигоклаза Ap_{0-28} (рис. 4) присутствуют в виде мелких (0,1–0,6 мм) неправильных, трещиноватых зерен, вытянутых вдоль плоскостей сланцеватости и равномерно распределенных в объеме породы.

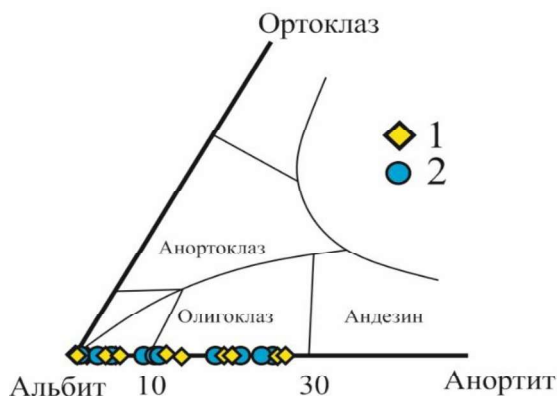


Рис. 4. Диаграмма вариаций химического состава полевых шпатов: 1—няртинского комплекса, 2—маньхобейнской свиты

Хлориты встречаются в виде чешуйчатых агрегатов, обладающих яркой интерференционной окраской буровато-зеленого цвета, реже аномальной фиолетовой. Минерал развивается по амфиболу, гранату, биотиту. В некоторых образцах амфиболитов наблюдается полное образование псевдоморфоз хлорита по гранату (рис. 5).

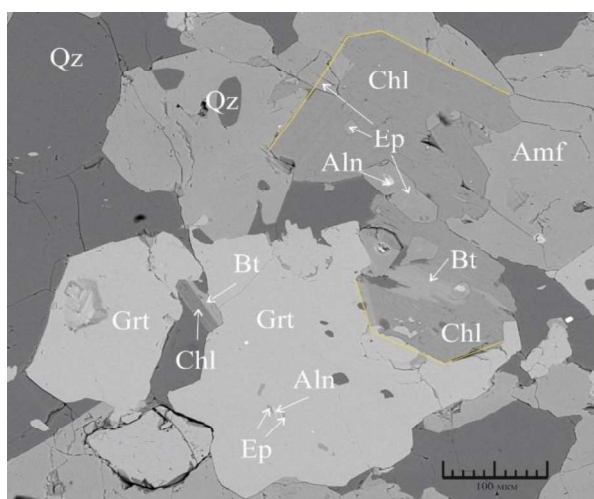


Рис 5. Псевдоморфозы хлорита по гранату в амфиболитах маньхобейнской свиты (Обр. 118). BSE-изображение

После пересчета результатов анализов на 28 атомов кислорода, составы хлоритов нанесены на диаграммы $Si-\sum Fe/(\sum Fe+Mg)$ (рис. 3 е). Основная часть фигуративных точек составов минерала попадает в поле рипидолита, другая часть соответствует пикнохлориту. Показатель железистости равен $X_{Fe}^{Chl} = 0,44-0,56$.

В амфиболитах маньхобейнской свиты встречаются лейсты биотита коричневатобуроватого цвета, представленные **аннитом** (рис. 3 f), замещающим преимущественно гранаты. Биотит характеризуется умеренным показателем железистости ($X_{Fe}^{Bt} = 0,4-0,56$). Титанистость биотитов изменяется в небольших пределах ($TiO_2 = 0,91-2,26$ масс %).

Минералы группы **эпидота** встречаются практически во всех образцах, однако большее содержание эпидотов обнаруживается в амфиболитах няртинского комплекса. Эпидот образует вытянутые зерна, развивающиеся по амфиболу. Скорее всего, он образовался за счет разрушения более основных плагиоклазов (Тимонина, 1980).

P-T условия метаморфизма

Результаты термодинамических расчетов параметров метаморфизма при помощи Amf-P1 геотермобарометров приведены на рис. 6. На диаграмме отношений $\sum Al (Amf)/Ca (Pl)$ (рис. 6 а) оценки P-T условий отвечают параметрам подгруппы V_3 группы фаций В-фации среднего давления (Добрецов и др., 1970). Оценка давлений с помощью геобарометра Г.Б. Ферштатера (рис. 6 б) дает схожие результаты: 6–1 кбар, причем нижние значения отвечают, вероятнее всего, регрессивной стадии метаморфизма уровня V_3 . Для уточнения показателей давлений были применены амфиболовые геобарометры. Результаты расчета давлений представлены в табл. 3.

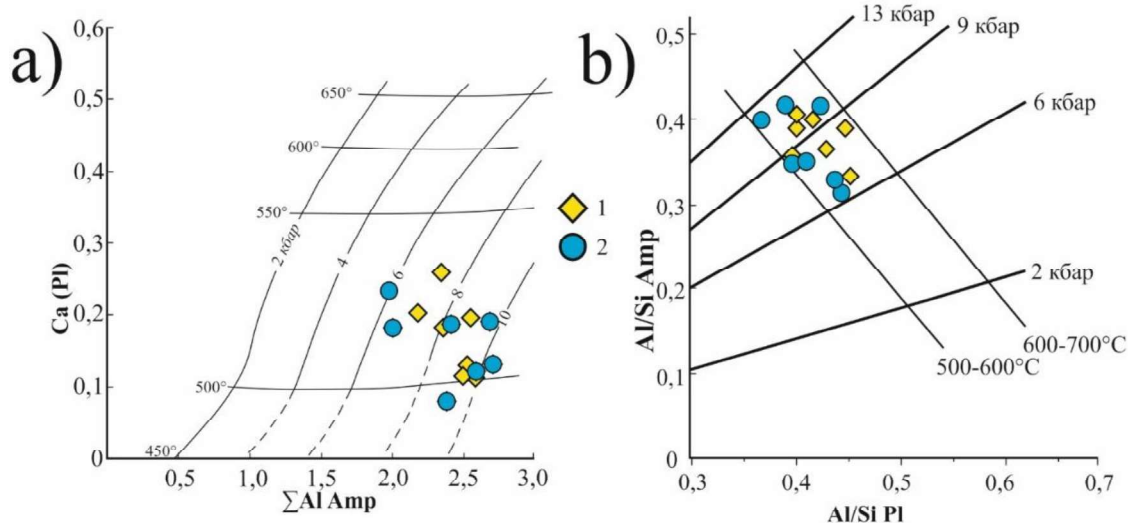


Рис. 6. P – T условия метаморфизма на амфибол–плагноклазовых геотермобарометрах. Диаграммы отношений: а) Al/Si в Pl и Al/Si в Amf ; ΣAl в Amp и Ca в Pl : 1 – няртинский комплекс, 2 – маньхобейнская свита

Для оценки пиковых значений параметров метаморфизма были произведены расчеты температур краевых частей зерен гранатов и контактирующих с ними амфиболов путем подстановки их составов в уравнение геотермометров.

По приведенным результатам в табл. 3 можно сделать вывод о прогрессивном ме-

таморфизме пород няртинского комплекса, температурные условия которого достигали $621^{\circ}C$. В породах маньхобейнской свиты значения пиковых условий температур немного ниже, однако в одном образце они достигают $629^{\circ}C$, что в целом говорит о схожести условий метаморфизма рассматриваемых пород.

Таблица 3. Расчет термодинамических параметров амфиболитов

Образец	Точка	Hbl–геобарометры		Grt–Hbl геотермометры			
		P, кбар Shmidt, 1991	P, кбар Hammarstrom, Zen, 1984	Wells, 1991	Perchuk, 1991	Graham; Powell, 1984	Powell, 1985
Няртинский комплекс							
11	3 9 Amf	9,51	9,62	596	545	594	599
	3 6 Grt к						
18	4 4 Amf	9,89	9,99	621	545	596	590
	4 3 Grt к						
29	2 26 Amf	8,72	8,85	614	551	615	591
	2 9 Grt к						
	2 36 Amf						
	2 18 Grt к			618	547	604	587
Маньхобейнская свита							
1262	2 7 Amf	8,29	8,45	517	453	550	550
	2 2 Grt к						
1381	1 13 Amf	8,39	8,54	624	575	622	629
	1 3 Grt к						
118	2 9 Amf	6,13	6,38	504	458	522	496
	2 2 Grt к						

В табл. 4 приведены результаты расчетов температур кристаллизации хлоритов. Полученные значения соответствуют интервалу температур 284–318°C, что в совокупности с петрографическими наблюдениями (процессы интенсивного замещения амфиболов – хлоритом, граната – хлоритом, реже биотитом) указывает на процессы диафореза в условиях низов фации В₄, что соответствует уровню фации зеленых сланцев.

Таблица 4. Температура кристаллизации хлоритов

Номер образца	Кол-во значений (n)	T °C, (Zang, Fufe, 1995)	T °C, (Kranidiotis, MacLean, 1987)	T °C (средняя)
Няртинский комплекс				
11	n=1	337	284	311
18	n=1	343	292	318
228	n=4	332	286	306
Маньхобеинская свита				
171	n=12	326	271	299
118	n=3	337	283	310
1262	n=3	334	278	306
1381	n=3	302	267	284

Обсуждение результатов

Изученные амфиболиты няртинского комплекса и маньхобеинской свиты характеризуются обычным метабазитовым парагенезисом Amf+Qz+Pl+Ep+Grt±Bt±Chl. Однако минеральный состав и петрографические особенности позволяют выделить два события преобразования пород. Первое определяется наличием парагенезиса Amf+Qz+Pl(And)+Ep+Grt±Bt, который устойчив в температурном диапазоне условий эпидот-амфиболитовой и низов амфиболитовой фации. Судя по химической зональности в гранатах, а также пройденным профилям с шагом 10 мкм и 40 мкм (рис. 9), можно сделать выводы о росте гранатов в условиях увеличения температур до отметки

в 620–630°C. В целом, для амфиболитов как няртинского комплекса, так и маньхобеинской свиты термодинамические параметры метаморфизма соответствуют уровню: T=550–630°C и P=6–10 кбар.

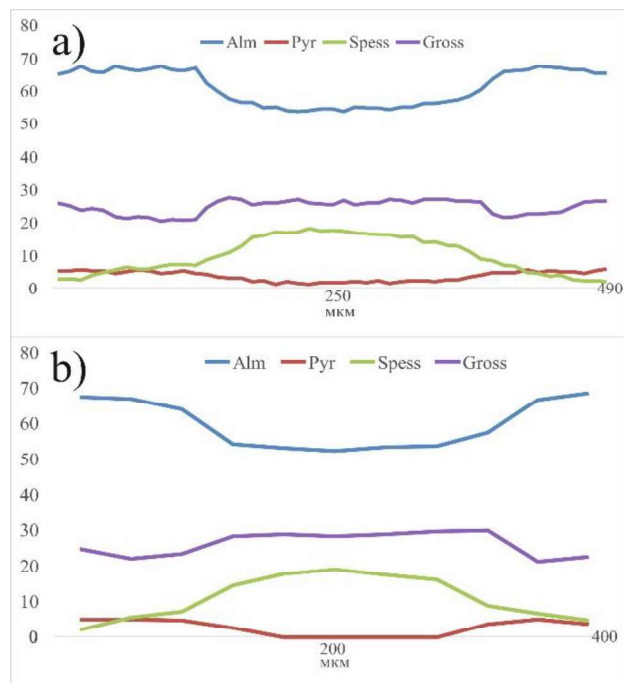


Рис. 9. Микрозондовые профили через зерна гранатов. а) няртинский комплекс обр. 29, шаг 10 мкм (50 точек), б) маньхобеинская свита, обр. 1262, шаг 40 мкм (10 точек)

Второй низкотемпературный эпизод привел к частичной перекристаллизации амфиболитов в рассматриваемых стратифицированных подразделениях. Он проявляется в замещении граната хлоритом с образованием псевдоморфоз, амфибола – хлоритом, альбитом. Здесь устанавливается присутствие новообразованных Qz+Pl(Alb)+Chl, что связано с процессами диафореза. Кроме того, некоторыми авторами (Тимонина 1980, Пыстин, 1994) было установлено наличие еще одного этапа, более высокотемпературного, отвечающего уровню амфиболитовой или гранулитовой фации. Об этом свидетельствует присутствие в породах высокотинистой роговой обманки и биотита, редких реликтов диоксида в роговой обманке, относительно высокого содержания пиропового минала в гранатах, имеющих регрессивную зональность и наличие циркона «гранулитового» типа.

Выводы

Учитывая минеральные парагенезисы, зональность гранатов, петрографические особенности, с учетом литературных данных, в амфиболитах няртинского комплекса и маньхобеинской свиты можно выделить три эпизода метаморфизма: 1 – ранний этап уровня амфиболитовой или гранулитовой фации (В₂, В₁), 2 – эпидот-амфиболитовой фации регионального метаморфизма, процессы которого в основном определяют современный облик нижней части разреза докембрийских образований района, 3 – дифференциация в условиях зеленосланцевой фации. Процессы метаморфизма эпидот-амфиболитовой фации, который рассматривается как второй этап метаморфизма, и последующие проявления зеленосланцевых преобразований в породах няртинского комплекса и маньхобеинской свиты были идентичными, что в совокупности со структурными данными (Пыстин, 1994; Потапов, Попвасев, 2017) подтверждает вывод о принадлежности маньхобеинской свиты и няртинского комплекса к одному структурному этажу и, вероятно, к одному и тому же стратону, то есть, в маньхобеинскую свиту ошибочно выделены диафориты, развитые в периферической части няртинского метаморфического комплекса.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (регистрационный номер 1021062211107-6-1.5.6)

Библиографический список

- Авченко О.В. Петрогенетическая информативность гранатов метаморфических пород. М. Наука, 1982. 104 с.
- Васильев Н.В., Удоротина О.В., Скоробогатова Н.В., Бородулин Г.П. Слюдя месторождения Тайкеу (Полярный Урал): состав и вопросы классификации // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2012. № 1. (205). С. 9–14.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000 (Изд. 2–е). Серия Полярно Уральская. Лист Q–41XXV / В.Н. Иванов, Т.Б. Жаркова, И.Ю. Курзанов и др. СПб.: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2001.
- Добрецов Н.Л., Реведатто В.В. и др. Фации метаморфизма. Т.1. М., 1970. 432 с.
- Нижний докембрий Приполярного Урала. / А.М. Пыстин, Ю.И. Пыстина, И.Л. Потапов и др. Сыктывкар: Геопринт, 2010. 44 с.
- Плюснина Л.П. Экспериментальное исследование метаморфизма базитов. М.: Наука, 1983. 151 с.
- Потапов И.Л., Попвасев К.С. Структурная эволюция докембрийских пород северной части Приполярного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2017. № 10. С. 9–20.
- Пыстин А.М., Пыстина Ю.И. Докембрий Приполярного Урала: хроностратиграфический аспект // Труды Карельского научного центра РАН, 2019. № 2. С. 34–52. DOI: 10.17076/geo904.
- Пыстин А.М., Пыстина Ю.И. Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярноуральского сегмента земной коры // Литосфера. 2008. № 11. С. 25–38.
- Пыстин А.М. Полиметаморфические комплексы западного склона Урала. СПб.: Наука, 1994. 208 с.
- Пыстин А.М., Пыстина Ю.И. Геологическая позиция и возраст маньхобеинской свиты (RF₁?) на Приполярном Урале // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 2018. № 9 (285). С. 3–10.
- Пыстина Ю.И., Пыстин А.М. Цирконовая летопись Уральского докембрия. Екатеринбург, УрО РАН, 2002. 168 с.
- Феритатер Г.Б. Эмпирический плагиоклаз-роговообманковый барометр // Геохимия. 1990. № 3. С. 328.
- Тимонина Р.Г. Петрология метаморфических пород Приполярного Урала. Л.: Наука, 1980. 100 с.
- Graham C.M., Powell R.A. Garnet–hornblende geothermometer: calibration, testing, and application to the Pelona Schist, Southern California. // J. Metamorf. Geol., 1984. V. 2, №. 1. P. 33–42.
- Hammarstrom J.M., Zen E–An. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer // Amer. Miner., 1986. V. 71. № 11/12. P. 1297–1313.
- Hey M.H. A new review of the chlorites // Mineralogical Magazine. 1954. № 30. P. 277–292.
- Kranidiotis P., MacLean W.H. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulphide deposit, Matagami, Quebec. Econ. Geol. 82, 1987, P. 1898–1911.
- Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C. et al. Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names // Mineralogical Magazine. 1997. Vol. 61, №. 2. P. 295–321.

Perchuk L.L. Derivation of thermodynamically consistent system of geothermometers and geobarometers for metamorphic and magmatic rocks. In: *Progress in metamorphic and magmatic petrology*. Ed. L.L. Perchuk. Cambridge University Press. 1990. P. 93–112.

Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet–clinopyroxene geothermometer revised. // *J. Metamorphic Geol.*, 1985. V. 3, №. 3. P. 231–243.

Schmidt M.W. Experimental calibration of the Al-in-hornblende geobarometer at 650 C, 3.5–13.0 kbar. // *Terra abstracts*, 1991. V. 3, №. 1. P. 30.

Wells P.R.A. P–T conditions in the Moines of the Central Highlands, Scotland. // *J. Geol. Soc. London*, 1979. Vol. 136. P. 663–671.

Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American mineralogist*. 2010. V. 95, №. 1. P. 185–187.

Zang W., Fyfe W.S. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarapé Bahia gold deposit, Carajás, Brazil. *Mineral. Deposital* 30, 30–38 (1995). <https://doi.org/10.1007/BF00208874>

Formation Mineralogy and P-T Conditions of Amphibolites of the Nyartín Metamorphic Complex and Mankhobeyskaya Suite of the Subpolar Urals

K.S. Popvasev

Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 54 Pervomayskaya Str., Syktyvkar 167982. Russia

E-mail: kspopvasev@geokomisc.ru

The article presents the results of studying the amphibolites of the Nyartinskiy Complex and the Mankhobeyskaya Suite. Based on the petrographic and mineral features of the rocks and the chemical zoning of the garnets, two episodes of metamorphism manifestations have been established. The first episode is characterized by a higher temperature (500–620°C), corresponding to the conditions of the epidote–amphibolite facies (B₃). The pressure at this stage is estimated at 6–10 kbar. The second episode corresponds to low-temperature diaphthoresis (284–318°C) in the greenschist facies (B₄). Similar conditions of the rocks metamorphism of the Nyartinskiy Complex and the Mankhobeyskaya Suite confirm the idea that Mankhobeyskaya Suite is not an independent stratigraphic unit, but is a complex of low-temperature diaphthorites in rocks similar to those that compose the Nyartinskiy Complex.

Key words: P–T conditions of metamorphism; Nyartinskiy Complex; amphibolites; epidote-amphibolite facies.

References

Avchenko O.V. 1982. Petrogeneticheskaya informativnost granatov metamorficheskikh porod [Petrogenetic information capability of metamorphic rocks garnets]. Nauka, Moskva, p. 104. (in Russian)

Vasiliev N.V., Udoratina O.V., Skorobogatova N.V., Borodulin G.P. 2012. Slyudy mestorozhdeniya Taykeu (Polyarnyy Ural): sostav i voprosy klassifikatsii [Micas of the Taykeu deposit (Polar Urals): composition and classification issues]. *Vestnik IG KSC of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 1(205):9–14. (in Russian)

Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii masshtaba 1:200 000 (Izd. 2–ye). Seriya Polyarno Uralskaya. List Q–41XXV [State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1:200,000 (Ed. 2nd)]. Series Polar Ural. Sheet Q–41XXV. Eds. V.N. Ivanov, T.B. Zharkova, I.Yu.

Kurzanov et al. 2001, FGUP “VSEGEI”, St. Petersburg, (in Russian)

Dobretsov N.L., Revedatto V.V. et al. 1970. Fatsii metamorfizma [Facies of metamorphism]. T.1. Moskva., p. 432. (in Russian)

Nizhniy dokembriy Pripolyarnogo Urala [Lower Precambrian of the Subpolar Urals]. Eds. A.M. Pystin, Yu.I. Pystin, I.L. Potapov et al. Geoprint, Syktyvkar, p. 44. (in Russian)

Plyusnina L.P. 1983. Eksperimentalnoye issledovaniye metamorfizma bazitov [Experimental study of mafic metamorphism]. Nauka, Moskva, p. 151. (in Russian)

Potapov I.L., Popvasev K.S. 2017. Strukturnaya evolyutsiya dokembriyskikh porod severnoy chasti Pripolyarnogo Urala [Structural evolution of accessory Precambrian rocks of the northern part of the Subpolar Urals]. *Vestnik of IG KSC, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 10:9–20. (in Russian)

- Pystin A.M., Pystin Yu.I.* 2019. Dokembriy Pripolyarnogo Urala: khronostratigraficheskiy aspekt [Precambrian of the Subpolar Urals: chronostratigraphic aspect]. *In: Proc. of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2:34–52 doi: 10.17076/geo904. (in Russian)
- Pystin A.M., Pystina Yu.I.* 2008. Metamorfizm i granitobrazovaniye v proterozoysko-rannepaleozoy-skoy istorii formirovaniya Pripolyarnouralskogo segmenta zemnoy kory [Metamorphism and granite formation in the Proterozoic–Early Paleozoic history of the formation of the Subpolar Ural segment of the Earth's crust]. *Litosfera.* 11:25–38. (in Russian)
- Pystin A.M.* 1994. Polimetamorficheskiye komplekсы zapadnogo sklona Urala. [Polymetamorphic complexes of the western slope of the Urals]. Nauka, Saint Petersburg, p. 208. (in Russian)
- Pystin A.M., Pystin Yu.I.* 2018. Geologicheskaya pozitsiya i vozrast mankhobeinskoy svity (RF₁?) na Pripolyarnom Urale [Geological position and age of the Mankhobeinskaya Suite (RF₁?) in the Subpolar Urals]. *Vestnik of IG KSC of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.* 9(285):3–10. (in Russian)
- Pystin Yu.I., Pystin A.M.* 2002. Tsirkonovaya leptopis Uralskogo dokembriya. [Zircon Chronicle of the Ural Precambrian]. *Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg,* p. 168. (in Russian)
- Fershtater G.B.* 1990. Empiricheskiy plagioklaz–rogovoobmankovyy barometr [Empirical plagioclase–hornblende barometer]. *Geochemistry.* 3:328. (in Russian)
- Timonina R.G.* 1980. Petrologiya metamorficheskikh porod Pripolyarnogo Urala [Petrology of metamorphic rocks of the Subpolar Urals]. Nauka, Leningrad, p. 100. (in Russian)
- Graham C.M., Powell R. A.* 1984. Garnet–hornblende geothermometer: calibration, testing, and application to the Pelona Schist, Southern California. *J. Metamorf.Geol.,* 2(1):33–42.
- Hammarstrom J. M., Zen E–An.* 1986. Aluminium in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *Amer. Miner.* 71(11/12):1297–1313.
- Hey M.H.* 1954. A new review of the chlorites. *Mineralogical Magazine.* 30:277–292.
- Kranidiotis, P., MacLean, W.H.* 1987. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulphide deposit, Matagami, Quebec. *Econ. Geol.* 82:1898–1911.
- Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C. et al.* 1997. Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Min. Magazine.* 61:295–321. doi: 10.1180/minmag.1997.061.405.13
- Perchuk L.L.* 1990. Derivation of thermodynamically consistent system of geothermometers and geobarometers for metamorphic and magmatic rocks. *In: Progress in metamorphic and magmatic petrology. Ed. L.L. Perchuk, Cambridge University Press,* pp. 93–112.
- Powell R.* 1985. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet–clinopyroxene geothermometer revised. *J. Metamorphic Geol.,* 3(3):231–243.
- Schmidt M.W.* 1991. Experimental calibration of the Al–in–hornblende geobarometer at 650 C, 3.5–13.0 kbar. *Terra abstracts.* 3(1):30.
- Wells P.R.A.* 1979. P–T conditions in the Moines of the Central Highlands, Scotland. *J. Geol. Soc. London.* 136:663–671.
- Whitney D.L., Evans B.W.* 2010. Abbreviations for names of rock–forming minerals. *American mineralogist.* 95(1):185–187.
- Zang W., Fyfe W.S.* 1995. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarapé Bahia gold deposit, Carajás, Brazil. *Mineral. Deposital.* 30:30–38. doi:10.1007/BF00208874