

ФОРМИРОВАНИЕ КОРОНАРНЫХ СТРУКТУР ПРИ МЕТАМОРФИЗМЕ БЕЛОМОРСКИХ ГАББРОИДОВ: ОСОБЕННОСТИ ЗОНАЛЬНОСТИ КОРОН

Т.Л.Ларикова

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
г. Москва*

Рассматриваются различные типы коронарных структур, исследованные в массивах лабрадорит-, перцолит-габброноритах и магнетитовых габбро, расположенных на островах Кандалакшского залива Белого моря, а также преобразование коронарных структур на начальных этапах амфиболизации друзитов. Реконструируется метаморфическая эволюция друзитов и вмещающих их тоналитовых гнейсов и амфиболитов. Подробно рассматриваются зональности пироксеновых и гранатовых корон, иллюстрирующие встречную диффузию в коронарных структурах. Для сравнения приводится зональность гранатовых корон, исследованная в гранулитах Воронежского кристаллического массива.

Габброиды с коронарными структурами известны во многих высокометаморфизованных комплексах: на Полярном Урале [1], на Енисейском кряже [2], в Пакистане [3], в Шотландии [4], в Норвегии [5], в Греции [6], в горах Адирондак в Северной Америке [7] и др. Термин "друзитовые структуры" был введен Е.С.Федоровым при описании докембрийских пород Беломорья [8]. В зарубежной литературе распространен термин "коронарные структуры". Друзиты представляют собой претерпевшие метаморфизм интрузивные породы габброноритового ряда, обладающие друзитовой (коронарной) структурой. Она выражается в нарастании концентрических реакционных кайм более поздних минералов (Hbl, Grt и Cpx) на магматические (Ol, Px) на их границе с плагиоклазом [9].

Габброиды с коронарными структурами широко распространены в Беломорском кратоне Балтийского щита. Друзиты расположены в "серых" гнейсах беломорской серии, сложенной тоналит-мигматит-гнейсовой и амфиболит-кристаллосланцевой ассоциациями, имеющими возраст 2.76-2.6 млрд. лет [10,11]. Внедрение расплавов габброноритов происходило примерно 2.45 млрд. лет назад [11]. Массивы габбро-норитов, имеющие, в основном, тектонические контакты с вмещающими породами, метаморфизованы и амфиболизированы по краям. Большинство исследователей относит метаморфическое преобразование друзитов к сфеконскому этапу метаморфизма, с которым связано становление Лапландского гранулитового пояса, примерно 1.9 млрд. лет назад [12].

Существует много описаний коронарных структур различного минерального состава, но еще не разработано общепринятой гипотезы их формирования. Интересным является вопрос участия флюидов в процессе роста корон, равновесность различных ассоциаций в друзитах (одновременно ли сформировались все каймы в коронарных структурах), механизм их формирования, а также причины прекращения роста корон. Существуют представления об образовании друзитовых структур при метаморфизме [13,14], однако большинство авторов по-

лагают, что формирование корон (в частности в породах Беломорья) происходило на ретроградном этапе метаморфизма [12,15]. Прогрэдный же характер метаморфизма, инициирующий образование корон, был рассмотрен лишь на примере метагабброидов Садбери [16]. Рассмотренная ранее [17] прогрэдная зональность в гранатах друзитов массива Толстик позволяет связать начальный этап формирования корон в Беломорских габброидах с прогрэдным метаморфизмом.

В настоящей статье рассматриваются различные типы коронарных структур, исследованные в массивах лабрадорит-, перцолит-габбро-норитах и магнетитовых габбро, расположенных на островах Кандалакшского залива Белого моря, а также преобразование коронарных структур на начальных этапах амфиболизации друзитов. Реконструируется метаморфическая эволюция друзитов и вмещающих тоналитовых гнейсов и амфиболитов. Кроме того, подробно рассматриваются зональности пироксеновых и гранатовых корон, иллюстрирующие встречную диффузию в коронах. Для сравнения приводится зональность гранатовых корон, исследованная в гранулитах Воронежского кристаллического массива. Образцы были отобраны из различных частей массивов габбро-норитов. Микрозондовые исследования были выполнены с помощью растрового электронного микроскопа CamScan с энергодисперсионной приставкой Link кафедры петрологии МГУ, аналитики Е.В.Гусева и Н.Н.Каратаева.

Массив Овечий

В образце габбро острова Овечий были обнаружены три типа коронарных структур со следующими последовательностями слоев:

1. $Tlc \rightarrow Cpx \rightarrow Grt \rightarrow Pl$
2. $Opx \rightarrow Cpx \rightarrow Hbl \rightarrow Pl$
3. $Cpx \rightarrow Hbl \rightarrow Pl$

В центрах коронарных структур первого типа (рис.1а) расположен тальк (миннесотаит), образовавшийся, вероятно, по оливину. Он окружен очень узкой (до 20 мкм) каймой клинопироксена. Внеш-

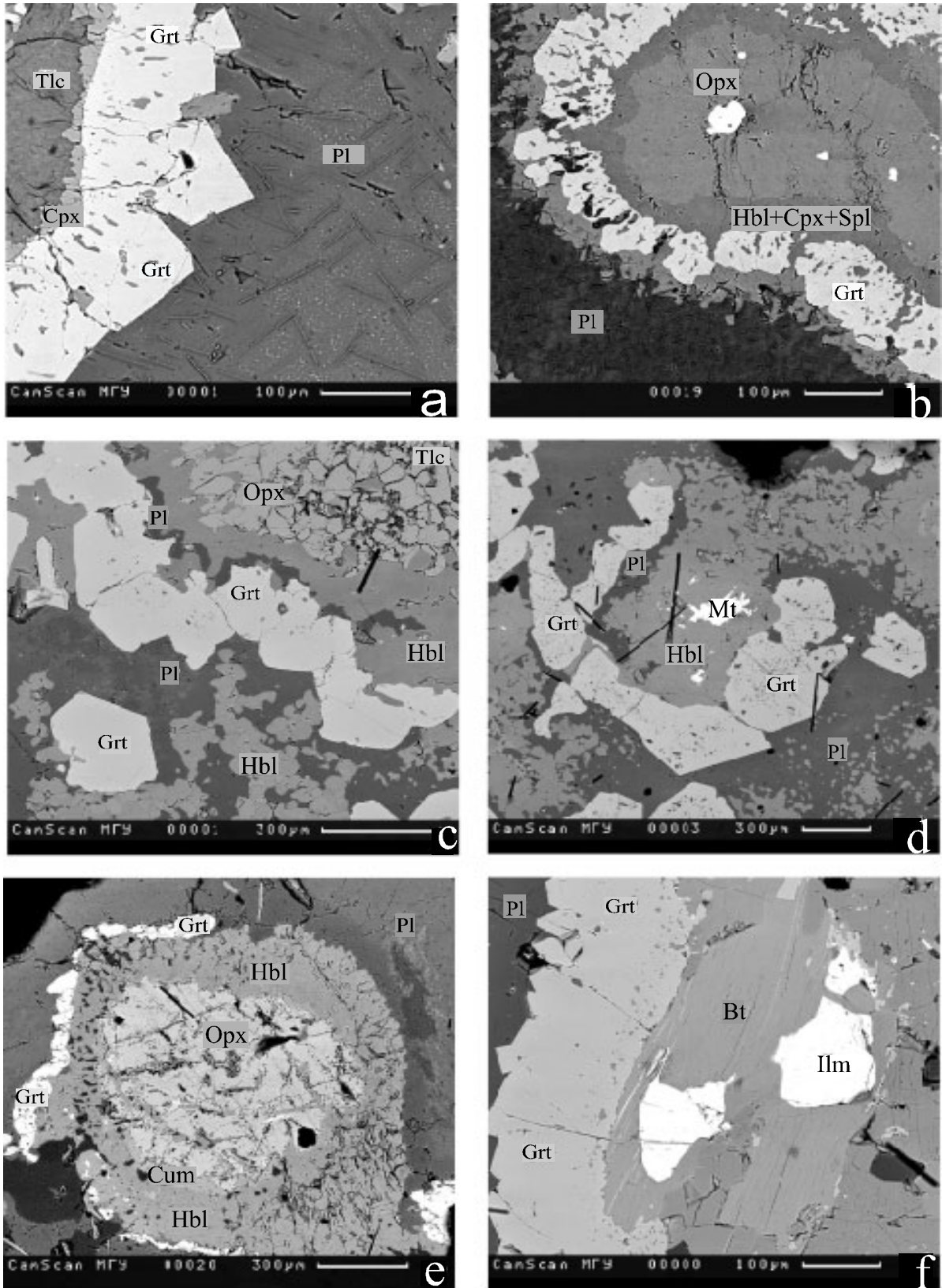


Рис.1 Коронарные структуры в Беломорских метагабброидах. Фотографии в отраженных электронах. а) короны Cpx и Grt вокруг первичного Ol, замещенного тальком в друзитах массива Овечий. В Grt короне наблюдаются включения Hbl. В Pl россыпь шпинели и иголки силлиманита. б) короны Opx, Hbl и Grt вокруг Ol, замещенного тальком в амфиболизированном друзите массива Овечий. Grt кайма отделяется от Hbl короны тонкой каймой новообразованного Pl. в) короны Hbl и Grt вокруг Mt в амфиболизированном друзите массива Овечий. Grt кайма отделяется от Hbl короны тонкой каймой новообразованного Pl. д) короны Hbl, Cum, Grt вокруг Opx в массиве Лодейный. Интересно отметить кайму более кислого плагиоклаза рядом с короной в правом верхнем углу рисунка. е) короны Opx, Hbl с Cpx и Sp и Grt вокруг Ol в габброидах массива Кривой-Горелый. В данном случае Ol весь заместился Opx, а зерно хромита сохранилось. ф) короны Bt и Grt вокруг Ilm в магнетитовых габбро массива Толстик.

Таблица 1

Химические составы минералов коронарных структур
вокруг ОI (талка) в друзитах массива Овечий

Минер. Точка Комм.	Talc 62	Cpx 63 корона	Cpx 64	Grt 65 край	Hbl 66 включ.	Grt 70 центр	Grt 73 край	Pl 72
SiO ₂	57.99	53.57	53.37	39.37	43.29	40.06	39.70	56.24
TiO ₂	0.08	0.00	0.02	0.00	0.70	0.02	0.01	0.03
Al ₂ O ₃	3.57	2.72	3.11	22.51	17.90	22.62	22.87	27.70
FeO	14.69	4.51	4.69	20.66	5.54	16.98	18.07	0.31
MnO	0.22	0.02	0.13	0.51	0.07	0.37	0.37	0.00
MgO	22.51	15.10	14.57	10.53	15.68	9.24	10.91	0.00
CaO	0.36	23.11	23.03	6.42	12.58	10.71	8.05	9.26
Na ₂ O	0.35	0.97	1.08	0.00	2.66	0.01	0.03	6.16
K ₂ O	0.24	0.00	0.00	0.00	1.60	0.00	0.00	0.30
Сумма	100.00	100	100	100	100.00	100.00	100.00	99.99
Кристаллохимические формулы								
Si	8.224	1.961	1.956	2.976	6.059	3.008	2.976	2.531
Ti	0.008	0.000	0.001	0.000	0.073	0.001	0.000	0.001
Al	0.596	0.117	0.134	2.004	2.950	2.000	2.019	1.468
Fe	1.738	0.138	0.143	1.303	0.647	1.064	1.130	0.012
Mn	0.027	0.001	0.004	0.033	0.008	0.023	0.024	0.000
Mg	4.752	0.823	0.795	1.185	3.268	1.033	1.217	0.000
Ca	0.055	0.906	0.904	0.520	1.886	0.861	0.647	0.446
Na	0.096	0.069	0.077	0.000	0.720	0.001	0.004	0.537
K	0.042	0.000	0.000	0.000	0.285	0.000	0.000	0.017
O	22	6	6	12	23	12	12	8
Сумма	15.54	4.01	4.01	8.02	15.90	7.99	8.02	5.01
X Mg	0.732	0.857	0.847	0.476	0.835	0.493	0.519	
N Pl								45

Таблица 2

Химические составы минералов коронарных структур в друзитах массива Овечий

Корона Минер. Точка Комм.	корона вокруг клинопироксена					корона вокруг ортопироксена							
	Cpx 33 перв.	Cpx 34 край	Hbl 35 кайма	Pl 36	Pl 37	Orx 53 перв.	Orx 54 край	Cpx 56 кайма	Pl 57	Hbl 58 корона	Hbl 59	Pl 60	
SiO ₂	53.04	53.13	43.79	58.91	54.94	55.20	54.76	53.62	59.36	44.03	43.56	58.12	
TiO ₂	0.51	0.28	1.68	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.23	0.09	0.00	
Al ₂ O ₃	3.21	3.45	15.27	25.99	28.57	1.22	2.17	3.96	25.51	16.99	17.58	26.30	
FeO	6.74	5.06	9.06	0.24	0.12	13.42	13.24	3.79	0.30	6.88	6.76	0.04	
MnO	0.13	0.16	0.08	0.00	0.15	0.15	0.29	0.12	0.09	0.00	0.03	0.01	
MgO	15.21	14.45	14.17	0.05	0.00	29.74	27.03	14.33	0.14	15.56	15.53	0.15	
CaO	19.99	22.09	12.09	7.39	10.84	0.26	2.34	22.14	6.57	12.44	12.44	8.00	
Na ₂ O	1.16	1.37	2.49	7.22	5.30	0.00	0.10	2.04	7.88	2.47	2.66	7.15	
K ₂ O	0.00	0.00	1.37	0.19	0.08	0.01	0.08	0.00	0.14	1.42	1.36	0.22	
Сумма	100	99.99	100	100.02	100	100.02	100.01	100	100.01	100.02	100.01	99.99	
Кристаллохимические формулы													
Si	1.947	1.948	6.216	2.632	2.478	1.966	1.961	1.956	2.652	6.177	6.114	2.603	
Ti	0.014	0.008	0.179	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.024	0.010	0.000	
Al	0.139	0.149	2.552	1.367	1.517	0.051	0.091	0.170	1.342	2.806	2.906	1.387	
Fe	0.206	0.155	1.074	0.009	0.004	0.399	0.396	0.115	0.011	0.805	0.792	0.002	
Mn	0.004	0.005	0.009	0.000	0.006	0.004	0.009	0.004	0.003	0.000	0.003	0.000	
Mg	0.831	0.789	2.994	0.003	0.000	1.577	1.441	0.778	0.009	3.251	3.244	0.010	
Ca	0.786	0.868	1.838	0.354	0.524	0.010	0.090	0.865	0.314	1.870	1.870	0.384	
Na	0.083	0.097	0.684	0.624	0.462	0.000	0.007	0.144	0.682	0.670	0.723	0.620	
K	0.000	0.000	0.248	0.011	0.005	0.000	0.004	0.000	0.008	0.253	0.243	0.013	
O	6	6	23	8	8	6	6	6	8	23	23	8	
Сумма	4.01	4.02	15.79	5.00	5.00	4.01	4.00	4.03	5.02	15.86	15.91	5.02	
X Mg	0.801	0.836	0.736			0.798	0.785	0.871		0.802	0.804		
N Pl				36	53				32			38	

ний край клинопироксеновой каймы более глинозёмистый и натровый (табл.1, ан. 64). Далее следует широкая (около 100 мкм) корона граната.

Короны второго типа окружают крупные первично-магматические неизмененные зерна ортопи-

роксена и не содержат граната. При этом внешний край первичного зерна ортопироксена более кальциевый (табл.2, ан.54). Короны сложены клинопироксеновой каймой (более натровой и кальциевой, чем другие клинопироксены) и широкой амфиболо-

Таблица 3

Химические составы минералов коронарных структур в амфиболитизированных друзитах массива Овечий

Корона	корона вокруг талька (оливина)									корона вокруг ильменита					
Минер. Точка Комм.	Ta O9 по O1	Opх O10 корона	Opх O11 корона	Hbl O12 корона	Hbl O13 корона	Pl O14 корона	Grт O15 корона	Grт O16 корона	Grт O17 корона	Hbl O35 корона	Hbl O36 корона	Grт O37 корона	Grт O40 корона	Grт O43 корона	Pl O44 корона
SiO ₂	61.37	53.64	53.80	48.92	48.42	59.58	38.10	38.83	38.83	42.94	43.56	38.32	39.01	39.03	57.15
TiO ₂	0.00	0.07	0.00	0.40	0.35	0.00	0.00	0.06	0.00	2.55	1.80	0.10	0.03	0.05	0.00
Al ₂ O ₃	3.50	0.93	0.93	10.59	11.12	25.16	22.05	22.05	21.86	14.41	15.16	21.67	22.11	22.11	27.05
FeO	5.14	18.84	19.03	8.02	8.25	0.38	24.72	21.99	22.31	9.06	9.28	23.60	21.46	23.20	0.29
MnO	0.10	0.41	0.18	0.00	0.11	0.08	0.67	0.40	0.53	0.10	0.00	0.44	0.41	0.41	0.07
MgO	28.45	25.63	25.47	17.31	16.93	0.00	8.87	8.72	8.04	13.59	13.87	8.07	9.05	9.20	0.07
CaO	0.00	0.19	0.25	12.25	12.22	6.88	5.57	7.71	8.44	11.97	11.75	7.54	7.90	6.00	8.76
Na ₂ O	1.44	0.27	0.34	2.03	2.14	7.88	0.03	0.15	0.00	2.79	2.75	0.09	0.05	0.00	6.54
K ₂ O	0.00	0.03	0.00	0.29	0.30	0.02	0.00	0.00	0.00	0.76	0.75	0.04	0.00	0.00	0.06
Сумма	100	100.01	100	99.81	99.84	99.98	100.01	99.91	100.01	98.17	98.92	99.87	100.02	100	99.99
Кристаллохимические формулы															
Si	8.319	1.966	1.971	6.824	6.769	2.663	2.939	2.973	2.980	6.210	6.233	2.960	2.975	2.983	2.565
Ti	0.000	0.002	0.000	0.042	0.037	0.000	0.000	0.003	0.000	0.276	0.194	0.006	0.002	0.003	0.000
Al	0.558	0.040	0.040	1.740	1.830	1.324	2.004	1.988	1.975	2.454	2.555	1.971	1.985	1.990	1.430
Fe	0.581	0.576	0.582	0.933	0.962	0.014	1.591	1.404	1.429	1.093	1.108	1.522	1.366	1.480	0.011
Mn	0.011	0.013	0.005	0.000	0.013	0.003	0.044	0.026	0.034	0.012	0.000	0.029	0.026	0.026	0.003
Mg	5.743	1.398	1.389	3.595	3.524	0.000	1.019	0.993	0.919	2.927	2.955	0.929	1.027	1.047	0.005
Ca	0.000	0.008	0.010	1.831	1.830	0.330	0.460	0.632	0.694	1.855	1.802	0.624	0.645	0.491	0.421
Na	0.379	0.019	0.024	0.547	0.578	0.682	0.004	0.022	0.000	0.781	0.762	0.013	0.008	0.000	0.568
K	0.000	0.001	0.000	0.051	0.053	0.001	0.000	0.000	0.000	0.140	0.136	0.003	0.000	0.000	0.003
O	22	6	6	23	23	8	12	12	12	23	23	12	12	12	8
Сумма	15.59	4.02	4.02	15.56	15.59	5.02	8.06	8.04	8.03	15.75	15.74	8.06	8.03	8.02	5.01
X Mg	0.908	0.708	0.705	0.794	0.785		0.390	0.414	0.392	0.728	0.727	0.379	0.429	0.414	
N Pl						33									43

вой. На контакте клинопироксеновой и амфиболовой корон присутствуют небольшие зерна плагиоклаза (An₃₁).

Крупные зерна клинопироксена с ортопироксеновыми ламеллями распада (вероятно, первичного пижонита) окружены лишь одной тонкой прерывистой каймой роговой обманки. Эта кайма менее глиноземистая и значительно более титанистая, чем другие амфиболы (табл.2, ан.35). Крупное зерно первичного клинопироксена несколько менее кальциевое и более натровое, чем короны, и кроме того, в этом зерне были обнаружены очень мелкие ламелли с высоким содержанием титана – вероятно, это рутил.

Плагиоклаз в породе имеет бурый цвет, что обусловлено включениями мелких (до 2 мкм) зерен шпинели. Плагиоклаз на контакте с гранатовыми коронами имеет состав An₄₅, на контакте с амфиболовыми - An₃₆₋₃₈. Зерно клинопироксена окружено ясно выраженной короной более кислого плагиоклаза (An₃₆) без включений.

В гранатовых коронах наблюдаются небольшие включения роговой обманки и биотита. Определения температуры по ним показывают более позднее переуравновешивание составов включений и контактирующего с ними граната.

При амфиболитизации рассмотренных выше друзитов в них формируется роговая обманка, а гранатовая корона отделяется от амфиболовой тонкой каймой новообразованного плагиоклаза. Исследованный образец (обр. 2/16) амфиболитизированного

друзита о-ва Овечий состоит из двух частей с хорошо развитыми коронарными структурами:

1. (Tlc →) Opх → Hbl → Pl → Grт → Pl
2. Ilm → Hbl → (Pl →) Grт → Pl

1. Короны развиваются вокруг талька (заместившего оливин) и сложены ортопироксеном, зеленой роговой обманкой, новообразованным плагиоклазом (An₃₃₋₃₄) и гранатом (рис.1b). У гранатовой короны с внешней стороны плагиоклаз имеет состав An₈₁. Ближе к контакту обеих частей породы тальк целиком замещается ортопироксеном, плагиоклазовая кайма из прерывистой цепочки зерен превращается в равномерную корону, шириной до 50 мкм, а кайма граната становится толще (до 300 мкм).

2. Короны развиваются по магнетиту и сложены бурым амфиболом, тонкой каймой плагиоклаза (An₄₄) и гранатом (рис.1c). По направлению к контакту наблюдаются те же тенденции, что и в первой части породы: гранатовая и плагиоклазовая каймы утолщаются. Большая степень изменения и амфиболитизации коронарных структур в обеих частях породы у их контакта связана с большей проницаемостью в этой зоне.

Различий в составе гранатовых корон в обеих частях породы обнаружено не было. Зональность отдельных зерен граната, расположенных в плагиоклазе в амфиболитах – ретроградная. В породе присутствует два амфибола – бурый в коронах по магнетиту и зеленый в коронах по оливину (тальку) (табл.3). У бурого амфибола – магнезиальность ниже, а содержание Al – выше, чем у зеленого, кроме

Таблица 4
Химические составы минералов коронарных структур вокруг Орх друзитов массива Лодейный

Минер.	Орх m1	Орх m13	Cum m14	Hbl m18	Grt m9	Grt m10
Точка	первичный					
Комм.						
SiO ₂	53.15	53.50	57.39	50.93	38.62	38.99
TiO ₂	0.12	0.00	0.00	0.62	0.03	0.05
Al ₂ O ₃	1.79	1.14	0.27	9.17	22.25	22.04
FeO	17.83	18.60	17.46	7.93	21.91	22.28
MnO	0.202	0.18	0.35	0.00	0.68	0.65
MgO	26.14	24.89	24.04	17.81	8.84	9.60
CaO	0.62	1.62	0.34	12.52	7.68	6.20
Na ₂ O	0.14	0.08	0.13	0.67	0.00	0.17
K ₂ O	0.02	0.00	0.02	0.37	0.00	0.04
Сумма	100.01	100.01	100	100.02	100.01	100.02
<i>Кристаллохимические формулы</i>						
Si	1.940	1.963	7.601	6.746	2.955	2.976
Ti	0.003	0.000	0.000	0.061	0.001	0.003
Al	0.077	0.049	0.042	1.430	2.005	1.981
Fe	0.543	0.569	1.930	0.876	1.399	1.419
Mn	0.006	0.005	0.039	0.000	0.044	0.042
Mg	1.420	1.360	4.740	3.512	1.007	1.091
Ca	0.024	0.064	0.049	1.777	0.629	0.507
Na	0.010	0.006	0.034	0.170	0.000	0.025
K	0.001	0.000	0.004	0.062	0.000	0.004
O	6	6	23	23	12	12
Сумма	4.02	4.02	14.44	14.64	8.04	8.05
X _{Mg}	0.723	0.705	0.711	0.800	0.418	0.435

того, по ильмениту развивается более титанистый амфибол.

В целом, при амфиболитизации коронитов тальк становится более натровым и магниезальным (табл.1,3); в амфиболах понижается содержание алюминия и повышается - титана. Гранаты в друзитах имеют магниезальность 0,5, амфиболиты заметно более железистые $X_{Mg}=0,25-0,3$. Содержание кальция в гранатах друзитов и амфиболитов одинаково.

Массив Лодейный

Вокруг крупных зерен ортопироксена на границе с плагиоклазом развивается несколько типов корон (рис.1d) (эти три типа можно наблюдать даже вокруг одного зерна Орх) (табл. 4):

- $Орх \rightarrow Hbl \rightarrow Grt \rightarrow Pl$
- $Орх \rightarrow Cum \rightarrow Hbl \rightarrow Grt \rightarrow Pl$
- $Орх \rightarrow Hbl \rightarrow Pl$.

Особой разницы в составе пироксена и плагиоклаза, по которым формируются различные каймы, обнаружено не было. Вокруг коронарных структур были установлены каймы более кислого (An_{44-47}) плагиоклаза, шириной около 50 мкм, в более основном (вероятно, первичном) - An_{66} . В составе роговой обманки также нет различий.

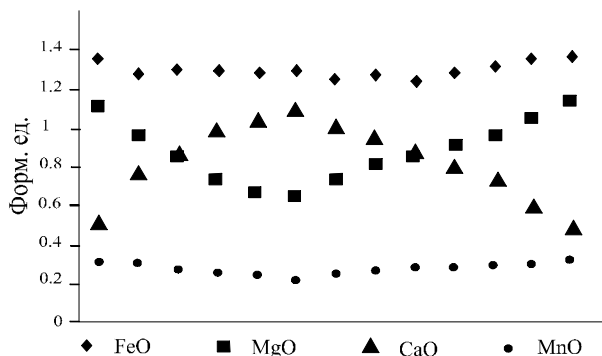


Рис.2 Зональность зерна граната в друзитах массива Лодейный.

Проградная зональность была отмечена в порфиробластах граната в друзитах п-ова Толстик [17]; подобный характер зональности установлен и в гранатах друзитов о-ва Лодейный: в крупных зернах граната обнаружена четко выраженная проградная зональность (рис.2). К краям зерна увеличивается содержание Mg, в ядре наблюдается пик кальциево-сти. В отличие от проградных гранатов массива Толстик, в центральной части зерен нет кальциевой "площадки".

Массив Кривой-Горелый

В метагабброидах этого массива было обнаружено два основных типа коронарных структур:

1. $Ol \rightarrow Орх \rightarrow Hbl \pm Spl \rightarrow Grt \rightarrow Hbl \pm Bt \rightarrow Pl$,
2. $Орх \rightarrow Срх \rightarrow Hbl \rightarrow Pl$,

Между оливином и плагиоклазом развиваются многослойные короны с гранатом (рис. 1e). В плагиоклазе были обнаружены очень мелкие, размером до 3 мкм, зерна шпинели и иголки силлиманита. Рядом с коронами располагается зона гомогенного плагиоклаза.

От оливина к плагиоклазу последовательно развиваются следующие короны:

1. широкая ортопироксеновая кайма;
2. корона, состоящая из роговой обманки с мелкими зернами шпинели (иногда содержатся отдельные кристаллы клинопироксена);
3. гранатовая кайма с мелкими включениями роговой обманки;
4. внешняя роговообманковая кайма с небольшим количеством биотита.

Возможно, вторая (амфиболовая) кайма была сначала сложена клинопироксеном и шпинелью, однако затем, по ней сформировался вторичный амфибол. В отдельных участках коронарных структур реликты клинопироксена сохранились, а в других местах - нет.

В породе были обнаружены аналогичные коронарные структуры без оливина (рис.1e), но с зернами хромита в центре корон. Этот факт не может свидетельствовать о другом типе корон - вероятно, в процессе роста корон весь оливин заместился ортопироксеном, а включения хромита в оливине сохранились.

Вокруг крупных зерен первичного ортопироксена были обнаружены короны, имеющие совершенно иное строение: они состоят из внутренней клинопироксеновой каймы и внешней роговообманковой (табл.5). Между этими двумя каймами иногда находятся мелкие (возможно, вторичные) зерна ортопироксена, содержащие до 0.1 форм.ед. Al. Клинопироксены в коронах по ортопироксену и по оливину в массиве Кривой-Горелый в целом похожи (табл.5), но клинопироксен, развивающийся по ортопироксену (ан.е33) содержит чуть больше алюминия и натрия по сравнению с клинопироксеном по оливину (ан.к5).

При амфиболитизации этих пород гранатовая корона, также как и в друзитах острова Овечий, отделяется от клинопироксеновой каймой плагиоклаза.

Магнетитовые габбро массива Толстик

Коронарные структуры в массиве лабрадорит-габбро-норитов Толстик были подробно описаны в [17]. Рассмотрим коронарные структуры в магнетитовых габбро из этого же массива. В породе были обнаружены крупные зерна клинопироксена с ортопироксеновыми ламеллами распада твердых растворов, вероятно, первично-магматического пижонита (табл.6). Вокруг крупных зерен магнетита и ильменита образуются следующие короны:

- $Mag \rightarrow Cpx \rightarrow Grt \rightarrow Pl$
- $Ilm \rightarrow Bt \rightarrow Grt \rightarrow Pl$
- $Cpx \rightarrow Ort \rightarrow Pl$

Зерно магнетита окружено тонкой (до 30 мкм) каймой клинопироксена и каймой граната шириной около 300 мкм. В коронах по ильмениту (рис.1f) ширина биотитовой короны варьирует от 30 до 200 мкм и больше. Гранатовые короны всех трех типов друзитовых структур аналогичны по составу и характеру зональности.

P-T параметры метаморфизма

Проградная зональность в гранатах массива Лодейный, а также описанная ранее зональность в породах массива Толстик [17] позволяет заключить, что формирование коронарных структур начиналось на проградном этапе метаморфизма. На ретроградном этапе метаморфизма происходит амфиболитизация и перекристаллизация коронарных структур, при этом друзиты трансформируются в гранатовые амфиболиты. Для определения параметров этих двух этапов метаморфизма были использованы следующие независимые геотермометры и геобарометры: Grt-Cpx [18], Grt-Hbl [19], Орх-Cpx и Hbl-Cpx, а также Grt-Bt, Sp-Cpx термометры для единичных определений [20]. Величины давлений, характерных для этапа формирования корон, равные 6-7 кбар, рассчитывались с помощью геобарометра Париа [21]. Аналогичные величины давлений были получены при использовании метода TWEEQ [22]. Кроме того, в плагиоклазе были обнаружены иголки силлиманита, что указывает на давление 3-8 кбар. Cpx-Pl-Qtz геобарометр [23] показал для всех пород

значения 6-9 кбар. По Grt-Hbl-Pl-Qtz геобарометру [24] было оценено давление, соответствующее этапу амфиболитизации — 4-5 кбар.

Определения температуры образования коронарных структур в массиве Овечий показали в среднем 660-680°C. В амфиболитизированных друзитах массива Овечий интервал температур несколько ниже — 590-670°C; зеленый амфибол (по тальку) менее высокотемпературный (560-610°C), чем бурый (по магнетиту) (650-680°C). Подобные различия по температуре и давлению можно объяснить тем, что ассоциация Grt-Cpx в коронах по оливину (тальку) устойчива до более низких температур.

Роговые обманки безоливиновых коронитов массива Лодейного и массива Толстик менее высокотемпературные (550-600°C). Гранатовые равновесия показывают температуру около 660°C. В магнетитовых габбро массива Толстик распад твердых растворов первичного пижонита произошел при температуре — 670°C по [25]. По гранатовым равновесиям можно определить температуру, равную 660-690°C. Температура формирования корон массива Кривой-Горелый укладывается в тот же интервал. В целом можно выделить два основных этапа формирования коронарных структур: рост корон при проградном метаморфизме (приблизительно при T=670°C и P=6-7 кбар) и этап амфиболитизации габброидов на ретроградном этапе метаморфизма (T=540-590°C, P=4-5 кбар). Аналогичные этапу амфиболитизации температуры демонстрирует термометрия включений роговой обманки и биотита в гранатовой кайме, а также контактовые зоны граната и клинопироксена, что указывает на позднее переуравновешивание составов минералов. Таким образом, всю ретроградную ветвь метаморфизма удастся четко проследить в различных типах коронарных структур.

Для сопоставления условий метаморфизма в друзитах и вмещающих породах были исследованы вмещающие архейские тоналит-грондьемитовые гнейсы и амфиболиты (рис. 7). Особое внимание было уделено зональности гранатов в них. Зональность зерен граната (рис. 3e) практически ровная (и магнезиальность и кальциевость), однако, к краю зерна наблюдается некоторое увеличение содержания марганца. Биотит-гранатовая термометрия в гнейсах массива Лодейный показала ретроградный тренд - от 680°C до 650°C. В гнейсах массивов Кривой-Горелый и Овечий геотермометры фиксируют снижение температуры до 615-630°C. В целом, эти P-T параметры хорошо укладываются в рассмотренный тренд метаморфизма и соответствуют условиям формирования коронарных структур в друзитах.

В тоналитовых гнейсах и гранатовых амфиболитах на полуострове Толстик были исследованы линзы гранатитов (Qtz-Hbl-Grt пород с реликтами клинопироксена). Зерна граната практически гомогенны, но к краю кристаллов наблюдается слабое ретроградное уменьшение магнезиальности. Термометрия показывает следующие результаты по

Таблица 5

Химические составы минералов коронарных структур в друзитах массива Кривой-Горелый

Корона	корона вокруг оливина														корона вокруг Орх		
Минер.	<i>Ol</i>	<i>Orx</i>	<i>Orx</i>	<i>Orx</i>	<i>Hbl</i>	<i>Cpx</i>	<i>Spl</i>	<i>Hbl</i>	<i>Grt</i>	<i>Grt</i>	<i>Grt</i>	<i>Hbl</i>	<i>Bt</i>	<i>Pl</i>	<i>Orx</i>	<i>Cpx</i>	<i>Hbl</i>
Точка	k17	k18	k19	k21	k23	k5	k22	k20	k24	k25	k28	k29	k30	k31	e32	e33	e35
Комм.	перв.	корона							край	центр	край				край	корона	корона
SiO ₂	39.46	56.22	55.49	52.07	43.77	53.78	4.03	43.62	39.13	39.19	39.38	42.62	40.19	55.77	54.88	54.04	43.98
TiO ₂	0.09	0.00	0.06	0.10	0.15	0.00	0.00	0.18	0.00	0.07	0.10	0.22	0.26	0.078	0.01	0.10	0.04
Al ₂ O ₃	0.00	0.75	1.40	2.46	17.44	2.45	61.55	16.92	22.92	23.04	22.65	19.43	20.94	28.49	2.47	3.80	17.48
FeO	18.32	12.38	12.40	12.25	6.17	4.38	15.91	6.34	18.13	16.76	19.56	7.08	6.42	0.05	11.66	3.45	6.49
MnO	0.12	0.23	0.08	0.02	0.00	0.00	0.18	0.07	0.64	0.42	0.56	0.03	0.19	0.06	0.15	0.01	0.08
MgO	41.99	30.15	30.44	30.00	16.55	15.36	16.76	16.79	10.65	10.26	10.53	14.53	22.14	0.00	27.94	14.86	15.90
CaO	0.00	0.21	0.12	2.96	12.53	22.99	1.26	12.34	8.41	10.26	7.20	12.31	0.00	9.41	2.60	22.12	12.43
Na ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.12	3.02	1.01	0.30	3.24	0.10	0.00	0.02	2.99	0.28	6.09	0.27	1.63	2.77
K ₂ O	0.00	0.02	0.00	0.00	0.38	0.00	0.02	0.49	0.00	0.00	0.00	0.77	9.59	0.01	0.00	0.00	0.78
Сумма	99.98	99.96	100	99.98	100.01	99.97	100.01	99.99	99.98	100	100	99.98	100.01	99.96	99.98	100.01	99.95
Кристаллохимические формулы																	
Si	1.006	1.991	1.965	1.873	5.850	1.967	0.103	5.847	2.946	2.943	2.970	5.727	5.684	2.506	1.953	1.962	6.147
Ti	0.002	0.000	0.002	0.003	0.015	0.000	0.000	0.018	0.000	0.004	0.006	0.022	0.027	0.003	0.000	0.003	0.004
Al	0.000	0.031	0.058	0.104	2.744	0.105	1.849	2.671	2.032	2.038	2.011	3.075	3.489	1.507	0.103	0.163	2.877
Fe	0.390	0.366	0.366	0.368	0.688	0.134	0.339	0.709	1.139	1.051	1.231	0.794	0.758	0.002	0.346	0.105	0.757
Mn	0.003	0.007	0.002	0.001	0.000	0.000	0.004	0.008	0.040	0.027	0.036	0.003	0.023	0.002	0.005	0.000	0.009
Mg	1.593	1.590	1.605	1.606	3.293	0.837	0.637	3.351	1.194	1.147	1.182	2.907	4.662	0.000	1.480	0.804	3.309
Ca	0.000	0.008	0.005	0.114	1.794	0.901	0.034	1.773	0.679	0.825	0.581	1.772	0.000	0.453	0.099	0.861	1.862
Na	0.000	0.000	0.001	0.008	0.781	0.072	0.015	0.841	0.015	0.000	0.002	0.778	0.076	0.529	0.018	0.114	0.750
K	0.000	0.001	0.000	0.000	0.065	0.000	0.001	0.083	0.000	0.000	0.000	0.131	1.728	0.000	0.000	0.000	0.138
O	4	6	6	6	23	6	24	23	12	12	12	23	23	8	6	6	23
Сумма	2.99	3.99	4.00	4.08	15.23	4.02	2.98	15.30	8.05	8.03	8.02	15.21	16.45	5.00	4.00	4.01	15.85
X_Mg	0.803	0.813	0.814	0.814	0.827	0.862	0.653	0.825	0.512	0.522	0.490	0.786	0.860		0.810	0.885	0.814
N_Pl														46			

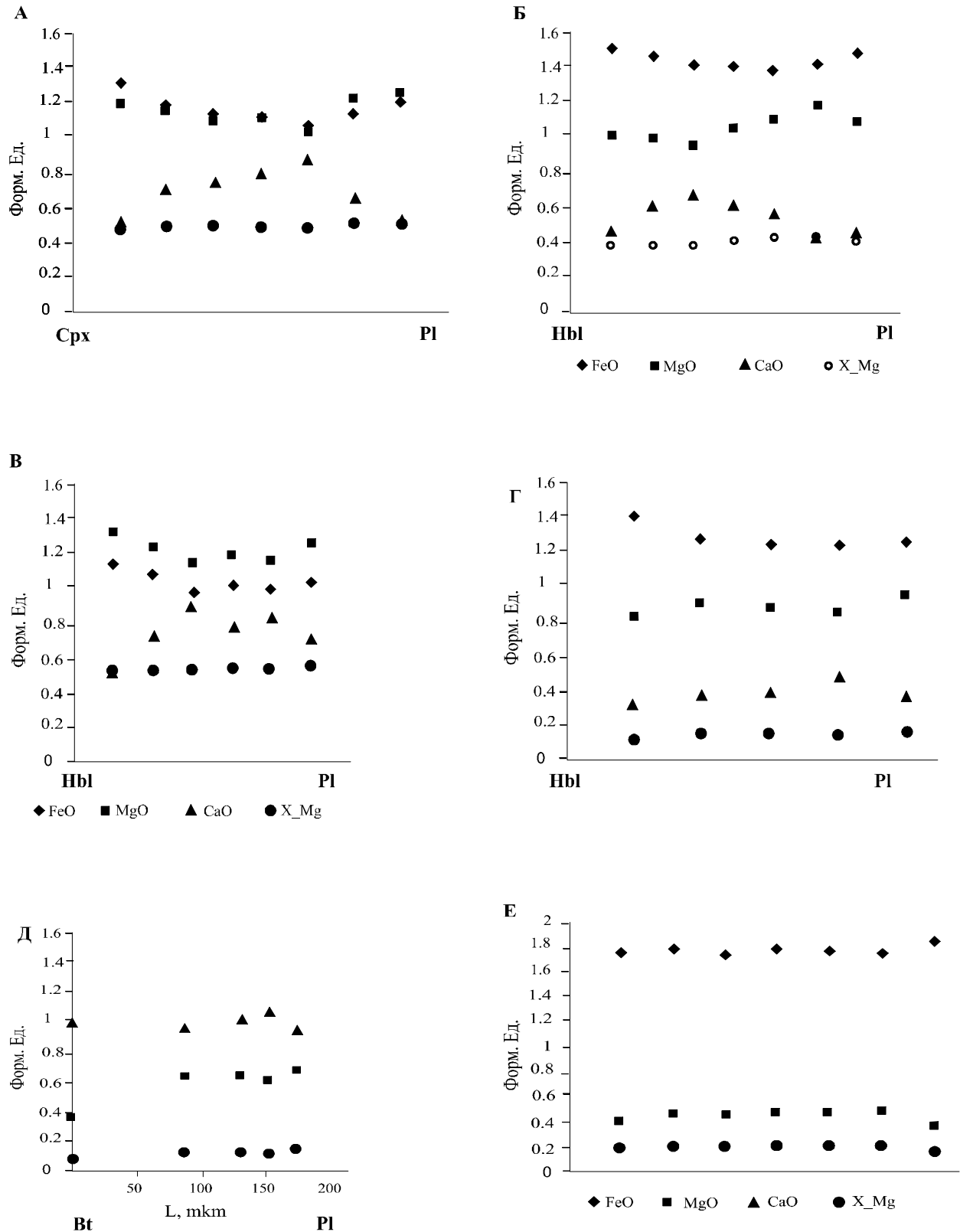


Рис.3. Профили через гранатовые короны в друзитах: а) корона по Ol (тальку) в друзите массива Овечий; б) корона по тальку в амфиболитизированном друзите массива Овечий; в) по Ol в друзите массива Кривой-Горелый; г) по Орх в друзитах массива Лодейный; д) по ильмениту в Mt габбро массива Толстик; е) профиль через зерно граната в тоналитовом гнейсе.

Таблица 6

Химические составы минералов корон в друзитах массива Толстик

Минер. Точка Комм.	<i>Vt</i> 33 по Ilm	<i>Cpx</i> 73 корона	<i>Cpx</i> 74	<i>Grt</i> 75	<i>Grt</i> 76	<i>Grt</i> 77	<i>Grt</i> 78	<i>Orp</i> лам. 79	<i>Cpx</i> 80
SiO ₂	37.72	50.78	51.37	37.01	37.23	37.51	37.66	49.02	51.94
TiO ₂	4.76	0.20	0.11	0.00	0.00	0.00	0.07	0.02	0.24
Al ₂ O ₃	14.75	1.97	1.49	20.62	20.71	20.56	20.95	0.70	2.03
FeO	22.32	14.21	13.17	32.13	31.21	30.53	30.32	35.49	13.20
MnO	0.00	0.15	0.02	1.06	0.69	0.63	0.60	0.59	0.06
MgO	10.99	10.38	10.84	2.34	3.27	3.28	3.11	13.65	10.21
CaO	0.00	21.00	21.93	6.80	6.67	7.43	7.28	0.39	21.32
Na ₂ O	0.33	1.29	1.01	0.00	0.21	0.00	0.00	0.11	0.94
K ₂ O	9.08	0.03	0.03	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.06
Сумма	99.95	100.01	99.97	99.96	99.99	99.98	99.99	99.97	100
<i>Кристаллохимические формулы</i>									
Si	5.794	1.946	1.961	2.982	2.981	2.996	3.000	1.957	1.974
Ti	0.549	0.006	0.003	0.000	0.000	0.000	0.004	0.001	0.007
Al	2.668	0.089	0.067	1.957	1.953	1.934	1.965	0.033	0.091
Fe	2.861	0.455	0.420	2.160	2.085	2.035	2.015	1.182	0.419
Mn	0.000	0.005	0.001	0.072	0.047	0.043	0.040	0.020	0.002
Mg	2.514	0.592	0.616	0.281	0.390	0.390	0.368	0.811	0.578
Ca	0.000	0.862	0.897	0.587	0.572	0.636	0.621	0.017	0.868
Na	0.098	0.095	0.074	0.000	0.033	0.000	0.000	0.009	0.069
K	1.776	0.001	0.001	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.003
O	22	6	6	12	12	12	12	6	6
Сумма	16.26	4.05	4.04	8.04	8.06	8.04	8.01	4.03	4.01
X Mg	0.468	0.566	0.595	0.115	0.157	0.161	0.155	0.407	0.580

равновесиям гранат-клинопироксен и гранат-амфибол: 628-656°C, что также хорошо согласуется с метаморфизмом друзитов и вмещающих тоналитовых гнейсов.

Особенности зональности коронарных структур

Для описания процессов образования корон рассматривается следующая модель: коронарные структуры различного минерального состава формируются по механизму диффузионного биметасоматоза при реакциях Fe-Mg минералов (Ol, Орх, Mag, Срх) с плагиоклазом (при встречной диффузии Са, Al, Si со стороны Pl, и Mg и Fe - со стороны железо-магнезиальных минералов). Как и в случае классического метасоматоза [26], все слои в коронах были сформированы одновременно, и в дальнейшем происходило только их разрастание. Подобный взгляд на коронарные структуры как продукт твердофазной диффузии в «сухой» системе давно рассматривался разными исследователями, например [27, 28]. Существуют представления, что на начальных этапах метаморфизма в друзитах были локальные неравновесные участки, в каждом из которых происходил реакционный рост определенных ассоциаций. Однако рассматриваемые выше коронарные структуры в магнетитовых габбро массива Толстик опровергают это: вокруг магнетита, на его контакте с плагиоклазом, образуются короны клинопироксена ($X_{Mg} = 0.6$) и граната ($X_{Mg} = 0.16$) (табл.6). Возможный источник магния для подобных коронарных структур – первичный пироксен. Кроме того, этот факт косвенно подтверждает присутствие межгранулярного флюида, который служил средой для

массопереноса при формировании корон. Рассмотрим зональность пироксеновых, гранатовых и амфиболовых корон для иллюстрации этого процесса.

Пироксены. Первично-магматические и коронарные ортопироксены, образующиеся по оливину, четко различаются между собой – их можно разделить на две группы по морфологии и составу:

- Первично-магматические – крупные зерна, темные при одном никеле, всегда окружены двойной NbI-Cpx каймой без граната. Краевые части крупных первичных зерен ортопироксена более кальциевые и глиноземистые. Вероятно, это изменение первичного состава произошло в процессе роста корон.
- Коронарные – представлены волокнистым агрегатом мелких зерен.

Во всех ортопироксеновых коронах и в друзитах массива Кривой-Горелый и в амфиболитизированных друзитах массива Овечий была обнаружена четкая зональность (табл.3 и 5): по направлению от оливина к плагиоклазу в кайме повышается содержание алюминия (с резким пиком на границе со следующей каймой).

В клинопироксеновых коронах, там, где они сохранились (не подверглись амфиболитизации) в магнетитовых габбро Толстика и в друзитах массива Овечий, можно также отметить похожее увеличение содержания Al и Са по направлению к плагиоклазу (табл.1 и 6). Клинопироксены в коронах по ортопироксену в массивах Кривой-Горелый и Овечий обычно содержат чуть больше алюминия и натрия по сравнению с клинопироксенами по оливину.

Амфиболы. В короне по оливину в друзитах массива Кривой-Горелый внутренняя кайма амфи-

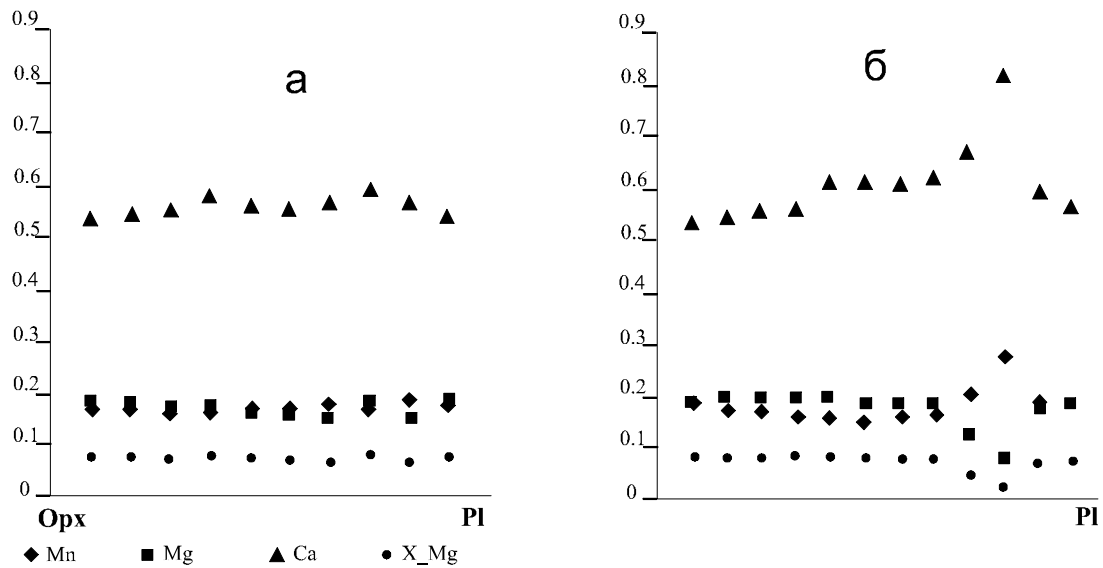


Рис.4. Профили через гранатовые короны в породах Воронежского кристаллического массива: а) корона по Орх; б) корона по Маг.

бола менее глиноземистая, чем внешняя (контактирующая с плагиоклазом). В массиве Лудейный наблюдается следующая последовательность корон: Орх-Cum-Hbl-Grt-Pl. Таким образом, менее кальциевый и менее глиноземистый амфибол располагается со стороны пироксена, а более глиноземистая роговая обманка - со стороны плагиоклаза.

В друзитах массива Кривой-Горелый кайма роговой обманки по ортопироксену менее кальциевая и глиноземистая, чем амфиболовые каймы по оливину. Аналогично в породах массива Овечий амфиболовая корона по клинопироксену содержит меньше Al и Ca, чем по ортопироксену. Это, вероятно, связано с меньшими градиентами концентрации на границе ортопироксена и плагиоклаза, по сравнению с контактом оливина и плагиоклаза.

Подобные зональности корон ортопироксена и амфибола хорошо иллюстрируют особенности градиентов концентраций (диффузионных потоков) Ca и Al со стороны плагиоклаза и Fe и Mg со стороны оливина или пироксенов.

Гранаты. В гранатовых коронах, как и во всех изученных ранее каймах гранатов из других друзитов [17], наблюдается схожий характер зональности (рис.3а-3д): в центральной части короны наблюдаются один или несколько пиков содержания кальция, свидетельствующие о том, что рост гранатовых кайм происходил от центральных частей корон к их краям. Характерна практически постоянная магнезиальность в гранатовых коронах. Однако в амфиболизированных коронарных структурах массива Овечий можно отметить небольшое снижение магнезиальности гранатовых кайм с обоих краев (рис. 3б), связанное, вероятно, с более поздними процессами формирования роговой обманки. Зональность гранатов в магнетитовых габбро массива Толстик демонстрирует те же черты, что и в других коронах, однако сами гранаты заметно более желе-

зистые, чем в других массивах, что можно объяснить более железистым валовым составом системы.

Аналогичные гранатовые короны были исследованы и в породах Центрального блока Воронежского кристаллического массива (обр. 2848/11), петрология и метаморфическая эволюция которых были подробно исследованы К.А.Савко [29]. Было проведено детальное микронзондовое профилирование через короны и зерна гранатов. В коронах вокруг ортопироксена и магнетита наблюдается схожий характер зональности (рис.4), как и во всех исследованных ранее коронах. В центральной части гранатовой короны (ближе к внешнему краю с плагиоклазом) наблюдается один или два (вокруг Орх) пика содержания кальция. Магнезиальность в целом постоянна по профилю, хотя в короне по магнетиту в районе пика кальциевости наблюдается некоторое уменьшение магнезиальности. Интересно, что магнезиальность гранатовых корон и вокруг магнетита и вокруг ортопироксена одинакова. Аналогичные соотношения были зафиксированы и в магнетитовых габбро массива Толстик. Это говорит о том, что диффузия была не только твердофазной, но также существовал и другой механизм диффузии, (возможно с участием флюида) который позволил магнию участвовать в формировании гранатовой короны по магнетиту.

Таким образом, вариации в минеральном составе коронарных структур невозможно объяснить лишь различиями в магнезиальности первичных минералов или составом первичного плагиоклаза. Например, в друзитах массива Кривой-Горелый магнезиальности первичных оливина и ортопироксена – практически одинаковы (табл. 5), в то время как минеральный состав корон сильно отличается. Состав плагиоклаза также может сильно различаться: Маркл [29] описал Grt-Px коронарные структуры, образующиеся в гиперстеновых гранитах, где

Таблица 7
Химические составы минералов вмещающих
тоналитовых гнейсов

Минер. Точка Комм.	Bt 3	Grt 4 с Bt	Bt 7	Pl 15	Grt 13 центр	Grt 14 край
SiO ₂	37.35	36.97	37.01	60.36	37.13	37.14
TiO ₂	4.29	0.00	4.11	0.00	0.14	0.03
Al ₂ O ₃	16.71	20.90	16.75	24.68	20.82	21.49
FeO	22.15	30.29	22.04	0.25	26.79	27.96
MnO	0.02	1.40	0.00	0.00	1.15	1.34
MgO	9.62	2.53	9.97	0.00	4.08	3.08
CaO	0.01	7.69	0.00	6.37	9.71	8.92
Na ₂ O	0.17	0.17	0.34	7.97	0.17	0.00
K ₂ O	9.68	0.06	9.79	0.36	0.03	0.04
Сумма	100	100.01	100.01	99.99	100.02	100
<i>Кристаллохимические формулы</i>						
Si	5.984	2.967	5.938	2.693	2.946	2.953
Ti	0.516	0.000	0.495	0.000	0.009	0.002
Al	3.151	1.975	3.166	1.297	1.946	2.012
Fe	2.961	2.028	2.951	0.009	1.774	1.855
Mn	0.003	0.095	0.000	0.000	0.077	0.090
Mg	2.295	0.302	2.382	0.000	0.482	0.364
Ca	0.002	0.661	0.000	0.305	0.825	0.760
Na	0.051	0.026	0.106	0.689	0.025	0.000
K	1.976	0.006	2.001	0.021	0.003	0.004
O	22	12	22	8	12	12
Сумма	16.94	8.06	17.04	5.01	8.09	8.04
X Mg	0.437	0.130	0.447		0.214	0.164
N Pl				31		

плаггиоклаз имеет, очевидно, более кислый состав, чем в габброидах. Различия в минеральном составе коронарных структур, образованных по первичному оливину, ортопироксену и клинопироксену, вероятно, связаны с различным содержанием кремния в этих минералах, и, следовательно, большим градиентом химических потенциалов диффундирующих компонентов.

Заключение

На начальных этапах амфиболитизации коронарных структур гранатовая кайма отделяется от амфиболовой тонкой каймой вторичного плаггиоклаза; гранатовые короны становятся шире и в них повышается содержание железа. Беломорские габброиды с коронарными структурами испытали метаморфическую эволюцию вместе с вмещающими тоналитовыми гнейсами и амфиболитами.

Исследованная зональность пироксеновых, амфиболовых и гранатовых корон иллюстрирует встречную диффузию Al и Ca со стороны плаггиоклаза и Fe и Mg со стороны оливина и пироксена. Состав рассмотренных корон (Grt и Crx) по магнетиту в метагаббро массива Толстик не соответствует модели твердофазной диффузии в "сухой" системе и свидетельствуют о существовании межгранулярного флюида. Вариации в минеральном составе коронарных структур невозможно объяснить лишь различиями в магнетиальности первичных минералов или составом первичного плаггиоклаза. Они, вероятно, связаны с различным содержанием кремния в этих минералах, и, следовательно, большим градиентом

химических потенциалов диффундирующих компонентов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 00-05-64574) и ФЦП «Интеграция» (проект С0007/2000).

ЛИТЕРАТУРА

1. Удовкина Н.Г. Эклогиты Полярного Урала М., 1971. - 191 с.
2. Ревердатто В.В. Гранатовые друзиты в архейских габбро Енисейского края // Докл. АН СССР. -1988. - Т.302, № 5. -С.1196-1200.
3. Jan M.Q., Karim A. Coronas and high-pressure veins in metagabbros of the Kohistan island arc, northern Pakistan: evidence for crustal thickening during cooling // J. Metam.Geol. -1995. -№13. -P.357-366.
4. Mongkoltip P., Ashworth J.R. Quantitative estimation of an open-system symplectite-forming reaction: restricted diffusion of Al and Si in coronas around olivine // J.Petrol. -1983. -V.24, №4. -P.635-661.
5. Mork M.B.E. Coronite and eclogite formation in Ol gabbro (W Norway): reaction path and garnet zoning // Miner. Mag. -1986. -V.50. -P.416-426.
6. Sapountzis E.S. Coronas from the Thessaloniki gabbros (North Greece) // Contrib. Miner. Petrol. -1975. -№51. -P. 197-203.
7. McLelland J.M., Whitney P.R. The origin of garnet in the anorthosite-charnockite suite of the Adirondack // Contrib.Mineral.Petrol. -1977. -V.60. -P.161-181.
8. Федоров Е.С. О новой группе изверженных пород // Изв. Моск. с.-х. ин-та. -1896. -№1. -С.12-29.
9. Магматические формации раннего докембрия территории СССР. Кн.1. -М., 1980. -С.134-148.
10. Бибикина Е.В., Богданова М.Н. Шельд Т. Новые U-Pb изотопные данные для архея Северо-Западного Беломорья // Докл. РАН. -1995. -Т.344, №6. -С.794-797.
11. Каулина Т.В. Результаты U-Pb датирования пород полуострова Толстик (Северо-Западное Беломорье) // Вопросы геологии Карело-Кольского региона. -Петрозаводск, 1996. -С.64-71.
12. Алексеев Н.Л., Лобач-Жученко С.Б., Богомолов Е.С. и др. Фазовые и изотопные (Nd) равновесия в друзитах массива Толстик и района губы Тупой, Северо-Западное Беломорье (Балтийский щит) // Петрология. -1999. -№1. -С.3-23.
13. Indares A., Rivers T. Textures, metamorphic reactions and thermobarometry of eclogitized metagabbros: a Proterozoic example // Eur.J.Mineral. -1995. -№7. -P.43-56.
14. Spear F.S., Markussen J. Mineral zoning, P-T-X-M phase relations, and metamorphic evolution of some Adirondack granulites, NY // J. Petrol. -1997. -V. 38, №6. -P.757-783.
15. Bogdanova S.V. High-grade metamorphism of 2.45-2.4 Ga age in mafic intrusions of the Belomorian Belt in the northeastern Baltic Shield // Precambrian Crustal Evolution in the North Atlantic Region, ed. Brewer T.S. -1996. -Geol.Soc. Spec.Publ. -№112. -P.69-90
16. Bethune K.M., Davidson A. Grenvillian metamorphism of the Sudbury diabase dyke-swarm: from protolith to two-pyroxene-garnet coronite // Can.Mineral. -1997. -V.35. -P.1191-1220.
17. Ларикова Т.Л. Формирование друзитовых (коронарных) структур вокруг оливина и ортопироксена при метаморфизме габброидов С. Беломорья, Карелия // Петрология. -2000. -№4. -С. 430-448.

18. Krogh E.G. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg thermometer - reinterpretation of existing experimental data // *Contrib. Miner. Petrol.* -1988. -V.99. -P.44-48.
19. Graham C.M., Powell R. A garnet-hornblende geothermometer: calibration, testing and application to the Pelona Schists, S. California // *J. Metam. Geol.* -1984. -V.2, №1. -P.33-42.
20. Gerya T.V., Perchuk L.L. GEOPATH - a thermodynamic database for geothermobarometry and related calculations with the IBM PC // *Abstr. Univ. Calgary Press.* -1990. -P.59-61.
21. Paria P., Bhattacharya A., Sen S.K. The reaction garnet+clinopyroxene+quartz=2 orthopyroxene+anorthite: a potential geobarometer for granulites // *Contrib. Miner. Petrol.* -1988. -V.99. -P.126-133.
22. Berman R.G. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrological applications // *Canad. Miner.* -1991. -V.29. -P.833-855.
23. Перчук А.Л. Новый вариант омфацил-альбит-кварцевого геобарометра с учетом структурных состояний омфацила и альбита // *Докл. РАН.* -1992. -Т.324. -С.1189-1286.
24. Kohn M.Y., Spear F.S. Empirical calibration of geobarometers for the assemblage garnet+hornblende+plagioclase+quartz // *Amer. Miner.* -1989. -V.74, №1-2. -P.77-84.
25. Перчук Л.Л., Рябчиков И.Д. Фазовое соответствие в минеральных системах. -М., 1976. -287с.
26. Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. // *Основы метасоматизма и метамагматизма.* -М., 1993. -С.127-195.
27. Joesten R. Evolution of mineral assemblage zoning in diffusion metasomatism // *Geoch.Cosm.Acta.* -1977. -V.41. -P.649-670.
28. Ashworth J.R. Fluid-absent diffusion kinetics of Al inferred from retrograde metamorphic coronas // *Amer.Mineral.* -1993. -V.78. -P.331-337.
29. Савко К.А. Гранулиты Воронежского кристаллического массива: петрология и эволюция метаморфизма. -Воронеж, 1999. -130 с.
30. Markl G., Foster C.T., Bucher K. Diffusion-controlled olivine corona textures in granitic rocks from Lofoten, Norway: calculation of Onsager diffusion coefficients, thermodynamic modelling and petrological implications // *J. Metam.Geol.* -1998. -V.16. -P.607-623.

