

УДК 552.16 : 552.521 (470.324)

© 1990 г.

САВКО К. А.

ЗОНАЛЬНОСТЬ МИНЕРАЛОВ И ПРОГРЕССИВНЫЕ МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ В СРЕДНЕТЕМПЕРАТУРНЫХ МЕТАПЕЛИТАХ ВОРОНЦОВСКОЙ СЕРИИ (Воронежский кристаллический массив)

В результате микрозондового изучения выявлены типы зональности ставролитов и гранатов из раннепротерозойских метапелитов. Ставролиты имеют определенные типы зональности для разных метаморфических зон и даже температурных ступеней. Гранаты из парагенезисов с ставролитом обогащены марганцем, большинство из них характеризуется ретроградным типом зональности.

Анализ парагенезисов, интерпретация составов и зональности ставролитов и гранатов позволили выделить последовательный ряд прогрессивных метаморфических реакций, происходящих с повышением температуры от ставролитовой до силлиманитовой зоны. Определен интервал P - T -условий метаморфизма: $P_{\text{общ}} = 3,0\text{—}3,6$ кбар, $T = 480\text{—}560^\circ$.

Общеизвестно, что химическая зональность минералов в метаморфических породах может дать важную информацию об условиях их образования и роста, об изменении температурного режима и реакциях, в которых они принимали участие. Изучению зональности гранатов и ее интерпретации было посвящено много работ [1, 8, 14, 15 и т. д.]. Другой очень важный минерал метаморфических пород — ставролит почти не изучен в этом отношении. В нескольких публикациях отмечалось, что некоторые кристаллы ставролитов имеют химическую зональность [7, 13, 16], однако попыток ее детальной интерпретации не предпринималось.

Настоящая работа имеет целью выявление зональности и ее типов в ставролитах из разных метаморфических зон и даже температурных ступеней. Предпринимается попытка объяснить образование химической зональности ставролитом изменением температурных условий метаморфизма и протеканием ряда прогрессивных метаморфических реакций в метапелитах воронцовской серии (юго-восток ВКМ). Для этой цели привлекаются также данные по зональности гранатов из парагенезисов с ставролитом.

Объектом настоящего исследования являются ставролит и силлиманитсодержащие метапелиты области перехода от ставролитовой фации к фации силлиманит-мусковитовых сланцев и гнейсов, задачей — интерпретация аналитических данных об изменении составов и характера зональности ставролитов и гранатов с повышением температуры от ставролитовой до силлиманитовой зоны.

Геологическая обстановка

Раннепротерозойские метапелиты воронцовской серии распространены в юго-восточной части Воронежского кристаллического массива (ВКМ) и занимают площадь около 70 тыс. км². Повсеместно они перекрыты осадочным чехлом мощностью от 80 до 450 м и более. Осадочно-метаморфические породы прорваны многочисленными интрузиями базит-гипербазитов мамонского, габбродолеритов новогольского, гранитов бобровского и дайками сиенитов артюшкинского комплексов.

Среднетемпературные метапелиты воронцовской серии изучались при картировании метаморфической зональности в пределах Елань-Эртильской структурно-тектонической зоны (рис. 1). В этом районе ме-

Рис. 1. Обзорная схема тектонического строения Воронежского кристаллического массива
 1 — протоплатформенные архейские блоки; 2 — мегаблок КМА; 3 — Воронежский блок; 4 — юго-восток ВКМ (Калач-Эртильский блок); 5 — структурно-тектонические зоны в пределах юго-востока ВКМ: I — Мамонско-Подколотновская, II — Озерковско-Ширяевская, III — Елань-Эртильская; 6 — глубинные разломы; 7 — район исследований метapelитов воронцовской серии

Рис. 2. Зональность ставролитов (а, б, в) и гранатов (г) из среднетемпературных метapelитов воронцовской серии
 1 — ставролиты и гранаты из ставролит-силлиманитовой зоны метаморфизма; 2 — ставролиты и гранаты из ставролитовой зоны метаморфизма; 3 — гранаты из силлиманитовой зоны метаморфизма; 4 — центр, пр. з. — промежуточная зона, кр. — край зерна. Номера около кружков соответствуют порядковым номерам парагенезисов из таблицы

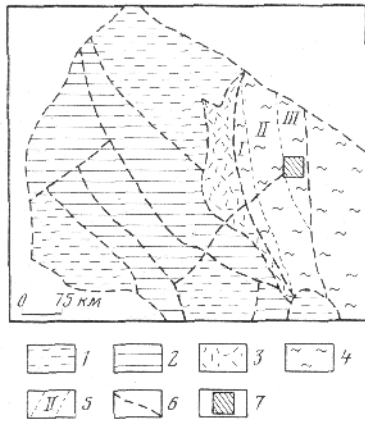


Рис. 1

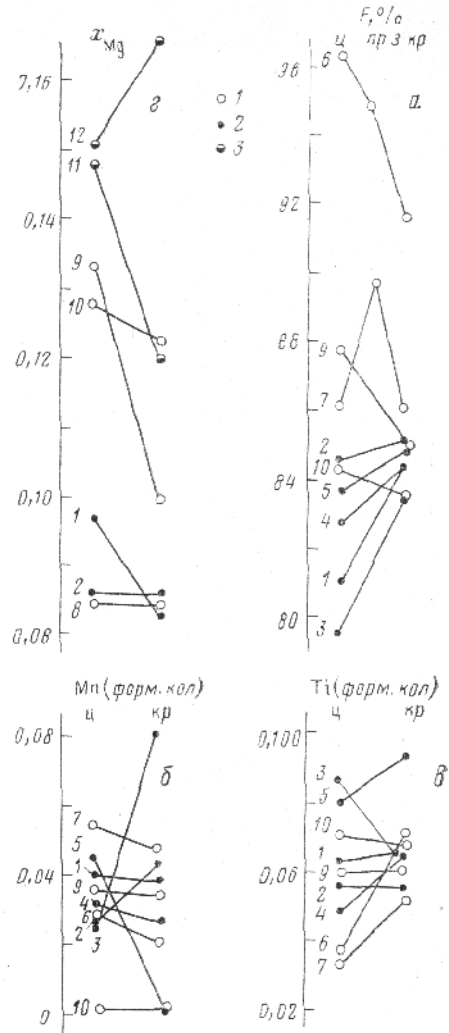


Рис. 2

тапелиты и метасаммиты воронцовской серии подверглись зональному метаморфизму в условиях биотитовой (?), гранатовой, ставролитовой, ставролит-силлиманитовой и силлиманитовой зон [6]. Сланцы и метапесчаники воронцовской серии имеют бластопсаммитовые и лепидогрантобластовые структуры. С увеличением температуры бластопсаммитовые структуры постепенно исчезают и в пределах ставролит-силлиманитовой зоны сохраняются только их реликты.

Минералы

Кварц и плагиоклаз составляют 45–70 вес. % в большинстве разновидностей метаморфических пород. Плагиоклаз довольно редко сдвойникован, содержит от 12 до 22% анортитовой составляющей. Четко выраженной зависимости изменения основности плагиоклазов от степени метаморфизма не установлено.

Биотит резко преобладает над другими слюдами в любой зоне метаморфизма, имеет форму от очень мелких чешуек до правильных лейст (1–2 мм). Иногда встречаются скопления агрегатов вторичного биотита, замещающего гранат. Биотиты имеют довольно постоянный состав и железистость в интервале 46–55%, что обусловлено, по-видимому, незначительными вариациями общего химического состава пород. Хорошо выраженной зональности в кристаллах биотита не наблюдается, не от-

мечено также закономерного изменения их состава с повышением степени метаморфизма. Очень характерно ретроградное замещение биотита грязно-зеленым хлоритом с появлением иголок сагешита.

Мусковит в относительно слабо метаморфизованных породах (низы ставролит-хлоритовой субфации) встречается довольно редко в виде мелких чешуек. С увеличением степени метаморфизма возрастает и количество мусковита, достигающее максимум 10–15% в силлиманитовой зоне. Здесь пластинки мусковита имеют размеры до 1–2 мм и очень часто образуют скопления «глазки» за счет замещения ими ставролита. Мусковиты содержат 10–17% фенгита и 11–12% парагонита.

Ставролит является наиболее распространенным (кроме биотита) железомagneзиальным силикатом. Он образует порфиробласты размером от 0,5 до 5 мм. Форма выделений различна, но преобладают овальные зерна, нередко крестообразные двойники. Наиболее гомогенны кристаллы ставролита из средней и верхней частей ставролит-хлоритовой субфации. С появлением в парагенезисах силлиманита в ставролитах резко возрастает количество пойкилитовых включений кварца, реже пирротина и пирита. Часто встречаются псевдоморфозы мусковита, реже биотита по ставролиту.

Ставролиты из парагенезисов ставролит-хлоритовой субфации среднежелезистые ($f^* = 79,5–85\%$) (таблица). Характерной их особенностью является повышение железистости и уменьшение магнезиальности от центра к краю кристаллов (рис. 2, а). В них постоянно присутствует небольшая примесь цинка ($ZnO = 0,26–0,27$ мас. %). С переходом к силлиманит-биотит-ставролитовой субфации ставролиты становятся более железистыми ($f = 83,7–96\%$). Несколько возрастают и содержания цинка (до 0,45 мас. % ZnO), причем его количество несколько увеличивается от центра к краям зерен. Зональность в ставролитах изменяется: от центра к краям кристаллов происходит нарастание магнезиальности, однако характер ее более сложный. Для его изучения по кристаллу ставролита было выполнено девять полных микрозондовых анализов по линии, проходящей через все зерно (рис. 3, а). Оказалось, что в его центральной части происходит повышение железистости. В промежуточной зоне нарастание железистости прекращается и к краю зерна наблюдается ее резкое снижение с одновременным увеличением магнезиальности (рис. 3, б).

Сложное зональное строение ставролитов из парагенезисов силлиманит-биотит-ставролитовой субфации отражено и в распределении марганца. Характер его концентрации противоположен содержанию железа: уменьшение содержания MnO от центра зерна с минимумами в промежуточных зонах и дальнейшим увеличением к краевым частям (рис. 3, в). В условиях ставролит-хлоритовой субфации слабо выраженное понижение марганцовистости ставролитов происходит от центра к внешним зонам кристаллов (рис. 2, б).

По титану зональность не имеет определенной направленности как в предыдущих примерах (рис. 3, г). И все же для ставролитов из парагенезисов ставролит-хлоритовой субфации в большинстве случаев отмечается увеличение титанистости от центра к краевым зонам кристаллов (рис. 2, в), что коррелируется с изменением их железистости.

Гранат хотя распространен реже ставролита, но довольно часто встречается в сланцах и метапесчаниках всех закартированных зон метаморфизма. Он представлен в основном додскаэдрическими кристаллами, порфиробластами округлой и овальной формы, в большинстве

В статье приняты сокращения: Ab — альбит, And — андалузит, Bi — биотит, Chl — хлорит, Gr — гранат, Ky — кианит, Mu — мусковит, Pl — плагиоклаз, Sil — силлиманит, St — ставролит, Q — кварц, Pi — пирит; $f = \frac{Fe}{Fe + Mg} \times 100\%$ (ат. кол.).

Цифры при символах железомagneзиальных силикатов ($St_{85,2}$) — их общая железистость. Относительно железистые, магнезиальные или марганцовистые разности минералов в каждом равновесии обозначаются индексами Fe, Mg, Mn (Gr_{Fe}). Обогащенные калием или натрием мусковиты обозначаются индексами K и Na (Mu_K).

Характеристика ставролитов и гранатов из

Компоненты	Ставролитовая					
	1) 8312-I, St+Bi+Gr+Q				2) 8309, St+Bi+Gr+	
	ставролит		гранат		ставролит	
	ц	кр	ц	кр	ц	кр
FeO	13,09	12,78	34,09	33,33	12,19	12,54
MgO	1,71	1,29	2,34	1,96	1,23	1,23
MnO	0,31	0,31	4,69	5,34	0,23	0,35
CaO	—	—	0,70	1,05	—	—
ZnO	0,26	0,27	—	—	Н. о	Н. о
f, %	81,1	84,7	89,1	90,5	84,7	85,2
x _{Mg}	0,185	0,149	0,097	0,083	0,150	0,144

Компоненты	Ставролит-силлиманитовая зона								
	6) 8053/300 St+Bi+Mu+And+Sill+Q			7) 8053/275 St+Bi+Mu+Sill+Q			8) 8002 St+Gr+Bi+Mu-Sill+Q		
	ставролит			ставролит			ставролит	гранат	
	ц	пр	кр	ц	пр	кр	кр	ц	кр
FeO	15,03	14,37	14,03	14,30	14,19	13,74	14,47	34,02	35,61
MgO	0,34	0,54	0,77	1,30	0,91	1,25	0,84	1,96	2,06
MnO	0,26	0,17	0,23	0,41	0,24	0,53	0,10	4,09	4,61
CaO	0,05	0,08	0,05	—	0,04	—	0,08	3,60	2,17
ZnO	Н. о	Н. о	Н. о	Н. о	Н. о	Н. о	Н. о	Н. о	—
f, %	96,2	93,9	91,0	86,1	89,7	86,1	90,6	90,6	90,5
x _{Mg}	0,037	0,060	0,088	0,136	0,101	0,135	0,094	0,085	0,085

Примечание. Для сокращения в таблице из результатов полных анализов приведены лишь содержания $f = 100 \times \text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ (ат. кол), $x_{\text{Mg}} = \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}+\text{Mn})$ (ат. кол). Анализы минеральных фаз выполнены на Т. И. Голованова. Н. о. — не опр., прочерк — не обн.

случаев содержит пойкилитовые включения кварца, плагиоклаза, биотита, ильменита, пирита, пирротина. Характерным является замещение граната по краям кристаллов и по трещинам в отдельных образцах хлоритом. Состав гранатов ставролитовой зоны железистый ($f = 87-91\%$), количество спессартинового минала — 9—12,5%, пиропового — 9,5%. Характерно увеличение количества MnO и уменьшение MgO в большинстве образцов от центра к краям кристаллов — т. е. ретроградная зональность (рис. 2, з). При повышении степени метаморфизма в парагенезисах со ставролитом и силлиманитом гранаты характеризуются меньшей железистостью, большей магниезностью (см. таблицу). Зональность выражена в уменьшении MgO и увеличении MnO от центров к краям зерен. Зональность гранатов из ставролитовой и ставролит-силлиманитовой зон идентичны. Но если в гранатах ставролитовой зоны такой тип зональности обусловлен, по-видимому, ретроградными метаморфическими процессами, то зональность гранатов из парагенезисов с ставролитом и силлиманитом образовалась вследствие прогрессивных реакций, которые рассматриваются ниже.

Силикаты глинозема в метapelитах воронцовской серии представлены андалузитом и силлиманитом. Андалузит встречается в парагенезисах с биотитом, ставролитом, хлоритом и гранатом и представлен порфиробластами, очень редко имеющими ромбовидные сечения. Обычно это кристаллы неправильной «лапчатой» или овальной формы. Последние почти всегда имеют хорошо выраженную спайность, содержат мало пойкилитовых включений других минералов. Иногда андалузит частично или даже полностью замещается тонкочешуйчатым мусковитом. С повышением степени метаморфизма в пределах ставролитовой зоны количество андалузита несколько увеличивается. Он пред-

среднетемпературных метapelитов воронцовской серии

зона											
+Mu+Pl+Q		3) 8312-II, St+Bi+Pl+Q				4) 8253, St+Bi+Pl+Q		5) 8312-III, St+Bi+Mu+Pl+Q			
гранат		ставролит									
ц	кр	ц	кр	ц	кр	ц	кр	ц	кр	ц	кр
34,43	34,49	12,35	12,76	12,74	12,79	12,43	13,27				
2,12	2,11	1,81	1,53	1,57	1,36	1,40	1,38				
5,59	5,64	0,18	0,66	0,26	0,22	0,37	—				
1,26	1,26	—	—	—	—	—	—				
—	—	Н. о	Н. о	Н. о	Н. о	Н. о	Н. о				
90,1	90,2	79,5	83,5	82,9	84,6	83,8	85,0				
0,086	0,086	0,201	0,159	0,168	0,151	0,158	0,150				

Ставролит-силлиманитовая зона								Силлиманитовая зона			
9) 8252-I St+Gr+Bi+Sill+Q				10) 8252-II, St+Bi+Gr+Sill+Q				11) 8240-I Gr+Bi+Mu+Sill+Q		12) 8282 Gr+Bi+Sill+Q	
ставролит		гранат		ставролит		гранат		гранат		гранат	
ц	кр	ц	кр	ц	кр	ц	кр	ц	кр	ц	кр
11,94	11,58	31,75	31,83	11,65	12,38	31,61	31,26	33,89	34,21	30,73	30,78
0,93	1,14	3,23	2,40	1,49	1,36	3,07	2,92	3,55	2,88	3,39	3,80
0,28	0,28	5,45	6,86	0,04	0,03	5,56	5,87	2,43	3,34	3,19	3,19
—	—	1,47	1,13	—	—	1,61	1,50	2,52	2,43	4,02	3,91
0,39	0,45	—	—	0,36	0,39	—	—	—	—	—	—
87,8	85,1	84,6	88,1	84,6	83,7	85,2	85,7	84,3	86,9	83,6	82,0
0,119	0,146	0,133	0,100	0,154	0,162	0,128	0,123	0,148	0,120	0,151	0,166

ния FeO, MgO, MnO, CaO и ZnO; ц — центральная, пр — промежуточная, кр — красная зоны кристаллов; микроанализаторах MS-46 (ИГЕМ АН СССР) и Камсбакс (ВСЕГЕИ), операторы Т. Д. Липатникова и

ставлен преимущественно «лапчатыми» порфиробластами с многочисленными пойкилитовыми вростками кварца и биотита. Андалузит иногда содержит включения ставролита, тогда как включений андалузита в ставролите не встречено. При переходе от ставролитовой к ставролит-силлиманитовой зоне в метapelитах сосуществуют оба силиката глинозёма. Реакционных взаимоотношений между ними не наблюдается.

Силлиманит в парагенезисах со ставролитом почти всегда представлен фибролитом, нередко прорастающим биотит. С переходом к силлиманитовой зоне он все чаще встречается в виде призм и тесно ассоциирует не только с биотитом, но и с мусковитом.

Довольно обычны для осадочно-метаморфических пород воронцовской серии первичный хлорит, встречающийся только до силлиманитовой зоны. Хлориты исчезают, по-видимому, в верхней части ставролит-силлиманитовой зоны. Вторичный хлорит распространен гораздо шире за счет ретроградных реакций замещения биотита, граната, реже ставролита. Имеются микрозондовые анализы только двух первичных хлоритов с железистостью 41 и 46,6%, в которых значения Mg/Fe больше, чем Mg/Fe ассоциированного с ними биотита. Среди рудных минералов в метapelитах воронцовской серии отмечаются пирит, пирротин, ильменит и халькопирит.

Парагенезисы и минеральные реакции прогрессивного этапа метаморфизма

Метapelиты воронцовской серии испытали в своей истории прогрессивный и ретроградный этапы метаморфизма. Последний этап характеризуется многочисленными ретроградными замещениями минералов,

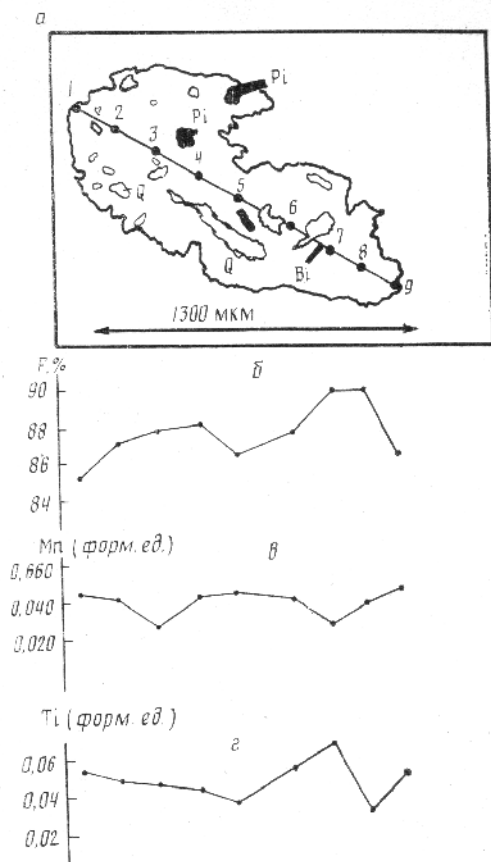


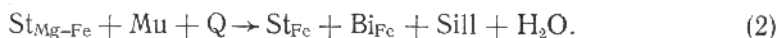
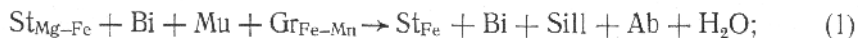
Рис. 3. а — зерно ставролита из образца 8053/275, цифры — местоположение точек микрозондового анализа; б, в, г — его зональность

образованием у части гранатов обратной зональности. В настоящей работе будут рассмотрены минеральные парагенезисы и реакции только прогрессивного этапа метаморфизма.

Критические минеральные парагенезисы каждой метаморфической зоны соответствуют правилу фаз и являются равновесными. Однако зональность многих кристаллов гранатов и ставролитов доказывает, что скорость их гомогенизации отстает от скорости изменения геотермического режима, и поэтому строго равновесными могут считаться только те части минералов, которые находятся в непосредственном контакте.

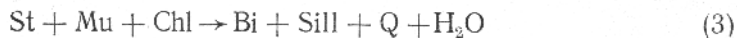
В верхней части ставролитовой зоны стабильны парагенезисы с умеренно железистыми ставролитами, содержащими незначительную примесь цинка — $St_{70,5-85} + Bi_{40-53} + Mu \pm And \pm Chl + Q$, нередко с железистым гранатом, например, в обр. 8312, $St_{84,7} + Gr_{90,5} + Bi_{53} + Q$ или обр. 8309, $St_{85,2} + Gr_{90,2} + Bi + Mu + Pl_{13} + Q$. При повышении температуры и переходе к нижней ступени ставролит-силлиманитовой зоны происходит появление в парагенезисах силлиманита, уменьшение количества граната и хлорита, резкое возрастание железистости ставролитов в безгранатовых парагенезисах ($St + Bi + Sill + Q + Pl \pm Mu$).

Эти изменения описываются следующими реакциями:



Реакция [1] происходит во всей верхней части ставролитовой зоны, о чем свидетельствует зональность ставролитов, почти у всех отмечается повышение железистости от центральных к краевым частям зерен

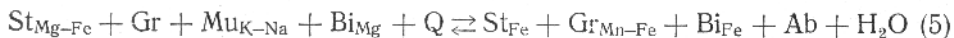
(рис. 2, а). Одновременно наблюдается резкое уменьшение количества хлорита



Возможно также, что увеличение железистости ставролитов в парагенезисах с гранатом обязано обменной реакции



и реакции, предложенной Гидотти при описании ставролит-силлиманитовых метapelитов района Рэнджели [11]:



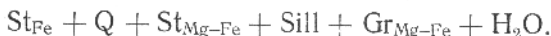
Необходимо отметить, что железистость ставролитов в безгранатовых парагенезисах всегда выше, чем с гранатом. Может быть, это объясняется тем, что реакции (4), (5) являются подчиненными по отношению к реакции (1). В результате последней происходит уменьшение количества граната в породах. Таким образом, на нижней ступени ставролит-силлиманитовой зоны в безгранатовых парагенезисах стабильны ставролиты с максимальной железистостью, например, в обр. 8053/300 (край) — 91,6%.

Все проанализированные гранаты из ставролитовой и ставролит-силлиманитовой зон содержат в краевой части более 4,5 мас.% MnO, поэтому необходимо учитывать влияние его при рассмотрении прогрессивных минеральных реакций. При распаде части гранатов в результате реакции (1) происходит концентрация марганца в оставшихся кристаллах, так как обогащение MnO других минеральных фаз не наблюдается. Это, по-видимому, одна из причин образования обратной зональности в гранатах. Повышенная марганцовистость гранатов стабилизирует довольно редко встречающийся парагенезис Gr+St+Sill.

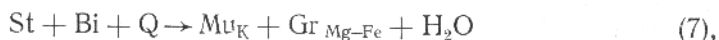
С увеличением температуры и переходом к верхней ступени ставролит-силлиманитовой зоны изменяется характер зональности ставролитов, происходит снижение их железистости (рис. 2, а). Этот процесс подтверждается информацией, полученной при детальном изучении распределения компонентов в ставролите из образца 8053/275: в центральной части наблюдается повышение железистости, в промежуточной зоне оно прекращается и к краю кристалла происходит ее резкое снижение с одновременным увеличением магнезиальности (рис. 3, б). Описанная сложная зональность ставролита объясняется тем, что на нижней ступени ставролит-силлиманитовой зоны в результате реакций (1) и (2) наблюдается нарастание его железистости, но с переходом к верхней ступени зоны начинается обратный процесс — ее снижения в результате реакции:



что более очевидно, если ее записать в промежуточном виде:



Следствием этой реакции является уменьшение количества ставролита и сужение поля его устойчивых составов. Ставролит по мере его разложения должен становиться все более магнезиальным [11, 16]. На верхней ступени ставролит-силлиманитовой зоны не исключено появление новых гранатов вследствие реакции:



предложенной в работах [12, 15], хотя она сильно зависит от $P_{\text{общ}}$.

При приближении к изограде исчезновения ставролита резко уменьшается его количество, кристаллы сильно корродируются кварцем, замещаются мусковитом и биотитом, становятся скелетными.

При переходе к силлиманитовой зоне основное значение принадлежит изоградской реакции: $\text{St} + \text{Mu} + \text{Q} \rightarrow \text{Bi} + \text{Gr} + \text{Sill} + \text{H}_2\text{O}$, в результате которой сразу за изоградой увеличивается количество граната гораздо менее

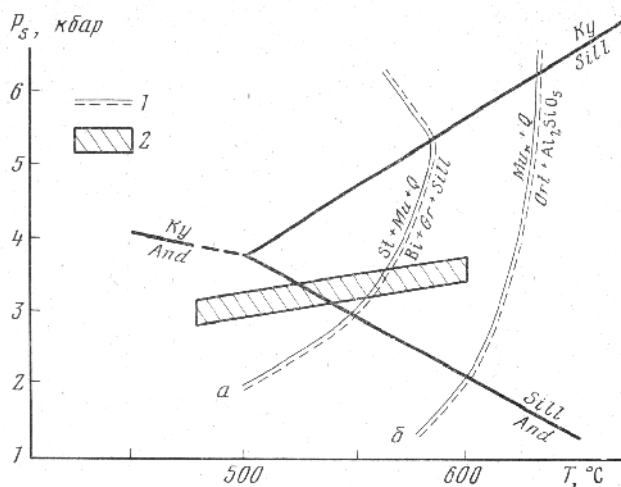


Рис. 4. P - T -условия прогрессивного метаморфизма среднетемпературных метапелитов воронцовской серии
 1 — границы фаций по [3]: а — ставролитовой, б — мусковит-биотитовых гнейсов; 2 — область P - T -условий прогрессивного метаморфизма среднетемпературных метапелитов воронцовской серии

марганцовистого и несколько более магниезиального, чем в парагенезисах с ставролитом (рис. 2, з). В редких случаях отмечаются мелкие реликтовые гранаты — включения в плагиоклазе сильно обогащенные (до 7,5 мас.%) MnO .

Для воронцовской серии трудно говорить о стабилизации устойчивости в более высокотемпературной области обогащенных цинком ставролитов из-за незначительного содержания в них ZnO (до 0,45 мас.%), как это отмечается рядом авторов для других регионов [3, 9, 11, 12]. Однако тенденция нарастания количества цинка от центра к краям зерен все же наблюдается.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что на верхней ступени ставролитовой и на нижней ставролит-силлиманитовой зон протекают преимущественно реакции, сопровождающиеся изменением составов ставролитов и смещения их в сторону железистых конечных членов. С переходом к верхней ступени ставролит-силлиманитовой зоны преобладают реакции прогрессивного разложения ставролита, вытесняемого из железистой области парагенезисом $Gr + Sill$ и поэтому характеризующегося меньшей железистостью, чем на предыдущей ступени.

В заключение этого раздела необходимо отметить, что все рассмотренные прогрессивные реакции есть отражение сужения стабильности и интервала устойчивых составов ставролита в сторону повышения температуры.

P - T -условия прогрессивного метаморфизма

Выводы о P - T -условиях прогрессивного метаморфизма среднетемпературных метапелитов воронцовской серии основаны на данных парагенетического анализа и минералогической гермобарометрии [2, 4, 5, 10]. Температура образования минеральных парагенезисов, определенная по разным геотермометрам, хорошо согласуется с данными по регионам со сходной метаморфической историей и известными петрогенетическими схемами.

Область полученных P - T -параметров нанесена на петрогенетическую сетку, предложенную С. П. Кориковским [3] (рис. 4). Изученные среднетемпературные метапелиты претерпели прогрессивный метаморфизм в следующих условиях: в пределах ставролитовой зоны $T = 480-520^\circ$, $P_{\text{общ}} = 3,0-3,2$ кбар, ставролит-силлиманитовой $T = 520-560^\circ$, $P_{\text{общ}} = 3,2-3,6$ кбар, силлиманитовой $T = 560-600^\circ$, $P_{\text{общ}} = 3,4-3,8$ кбар.

Автор выражает глубокую благодарность С. П. Кориковскому, прочитавшему рукопись и сделавшему очень важные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авченко О. В. Петрогенетическая информативность гранатов метаморфических пород. М.: Наука, 1982. 104 с.
2. Аранович Л. Я., Подлесский К. В. Гранат-плагиоклазовый геобарометр//Докл. АН СССР. 1980. Т. 251. № 5. С. 1216—1219.
3. Кориковский С. П. Фации метаморфизма метапелитов. М.: Наука, 1979. 263 с.
4. Перчук Л. Л., Лаврентьева И. В., Аранович Л. Я. и др. Биотит-гранат-кордиеритовые равновесия и эволюция метаморфизма. М.: Наука, 1983. 196 с.
5. Перчук Л. Л. Эволюция метаморфизма//Эксперимент в решении актуальных задач геологии. М.: Наука, 1986. С. 151—173.
6. Савко К. А. Региональный метаморфизм и металлогения юго-восточной части Воронежского кристаллического массива//Сов. геология. 1988. № 10. С. 83—89.
7. Федькин В. В., Гирнис А. В., Яковлева Л. Ю. Термодинамические условия образования древнейших метаморфических толщ северного Памира//Очерки физико-химической петрологии. М.: Наука, 1983. Вып. XI. С. 172—214.
8. Anderson D. E., Glenn R. B. Zoning in garnets. Diffusion models//Contrib. Mineral. and Petrol. 1973. V. 40. № 1. P. 87—140.
9. Ashworth J. R. Staurolite at anomalously high grade//Contrib. Mineral. and Petrol. 1975. V. 53. № 4. P. 281—291.
10. Ferry J. M., Spear F. S. Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet//Contrib. Mineral. and Petrol. 1978. V. 66. P. 113—118.
11. Guidotti C. V. Transition from staurolite to sillimanite zone, Rangeley quadrangle, Maine//Bull. Geol. Soc. Amer. 1974. V. 85. № 3. P. 475—490.
12. Hiroi Y. Progressive metamorphism of the Unasuki pelitic shists in the Hida terrane, central Japan//Contrib. Mineral. and Petrol. 1983. V. 82. № 2. P. 334—350.
13. Hollister L. S., Bence A. E. Staurolite: sectorial compositional variation//Science. 1967. V. 158. № 3804. P. 1053—1056.
14. Miyashiro A., Shido F. Progressive compositional change of garnet in metapelite//Lithos. 1973. V. 6. № 5. P. 762—775.
15. Tracy R. I., Robinson P., Thompson A. B. Garnet composition and zoning in the termination to pressure and temperature of metamorphism, Central Massachusetts//Amer. Mineralog. 1976. V. 61. № 5—6. P. 762—775.
16. Yardley B. W. D., Leake B. E., Farrow C. M. The metamorphism of Fe-rich pelites from Connemara, Ireland//J. Petrol. 1980. V. 21. № 2. P. 365—399.

Воронежская геолого-геофизическая
экспедиция

Поступила в редакцию
18.04.89