

УДК 552:552.321.5(470.324)

© 1992 г. САВКО К.А.

## ПЕТРОЛОГИЯ КСЕНОЛИТОВ МЕТАПЕЛИТОВ В ПОСТМЕТАМОРФИЧЕСКИХ ГАББРОНОРИТАХ И ДИОРИТАХ ВОСТОКА ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА

При внедрении постметаморфические интрузии габброноритов и диоритов захватывали ксенолиты вмещающих их среднетемпературных метапелитов. В результате термального воздействия основного расплава, недосыщенного калием и кремнеземом, образование в них новых более высокотемпературных парагенезисов сопровождалось выносом этих компонентов. Поэтому прогрессивное замещение биотита гиперстеном и кордиеритом происходило без образования калиевого шпата.

Температуры контактового метаморфизма оцениваются в 680—780°.

В настоящее время опубликовано много работ по петрологии регионально-метаморфизованных пелитов, однако их ксенолиты в постметаморфических магматических породах изучены весьма слабо. Цель настоящей работы — частично восполнить этот пробел: изучить изменения в парагенезисах и составах минералов в ксенолитах, захваченных интрузиями габброноритов и диоритов из вмещающих их среднетемпературных метапелитов.

### Геологическая обстановка

Восточную часть Воронежского кристаллического массива (ВКМ) занимает воронцовский мегасинклиорий. Это крупная, вытянутая в меридиональном направлении структура, занимающая площадь ~70000 км<sup>2</sup>, выполнена раннепротерозойскими осадочно-метаморфическими породами воронцовской серии. Эти отложения прорваны многочисленными постметаморфическими интрузиями различной формационной принадлежности, на основании которой выделены четыре магматических комплекса: мамонский, включающий широкий спектр пород от диоритов до перидотитов, бобровский, представленный гранитами, артюшкинский дайками сиенитов и новогольский интрузивными траппами. Интрузии захватывают ксенолиты вмещающих метапелитов различных фаций метаморфизма, которые при этом перекристаллизовываются в новых контактовых условиях, более высокотемпературных, чем региональный метаморфизм.

Материал для исследований был получен при бурении скважин в процессе глубинного геологического картирования и поисковых работ на никель. Были изучены ксенолиты из трех крупных интрузивных массивов: габброноритовых Еланского и Ширяевского и диоритового Листопадовского (рис. 1). Еланский и Ширяевский плутоны прорывают регионально-метаморфизованные пелиты с ассоциациями ставролитовой и ставролит-силлиманитовой зон, Листопадовский локализован в пределах мусковит-силлиманитовой зоны [6]. Минеральные ассоциации ксенолитов метапелитов приведены в табл. 1<sup>1</sup>. Вмещающими

<sup>1</sup> В статье приняты сокращения: And — андалузит, Bt — биотит, Cor — кордиерит, Gedr — жедрит, Grt — гранат, Hpr — гиперстен, Ilm — ильменит, Kfs — калиевый полевой шпат, Ms — мусковит, Pl<sub>20</sub> — плагиоклаз и его номер, Po — пирротин, Q — кварц, Ram — ромбический амфибол, Sill — силлиманит, Sp — шпинель, St — ставролит.

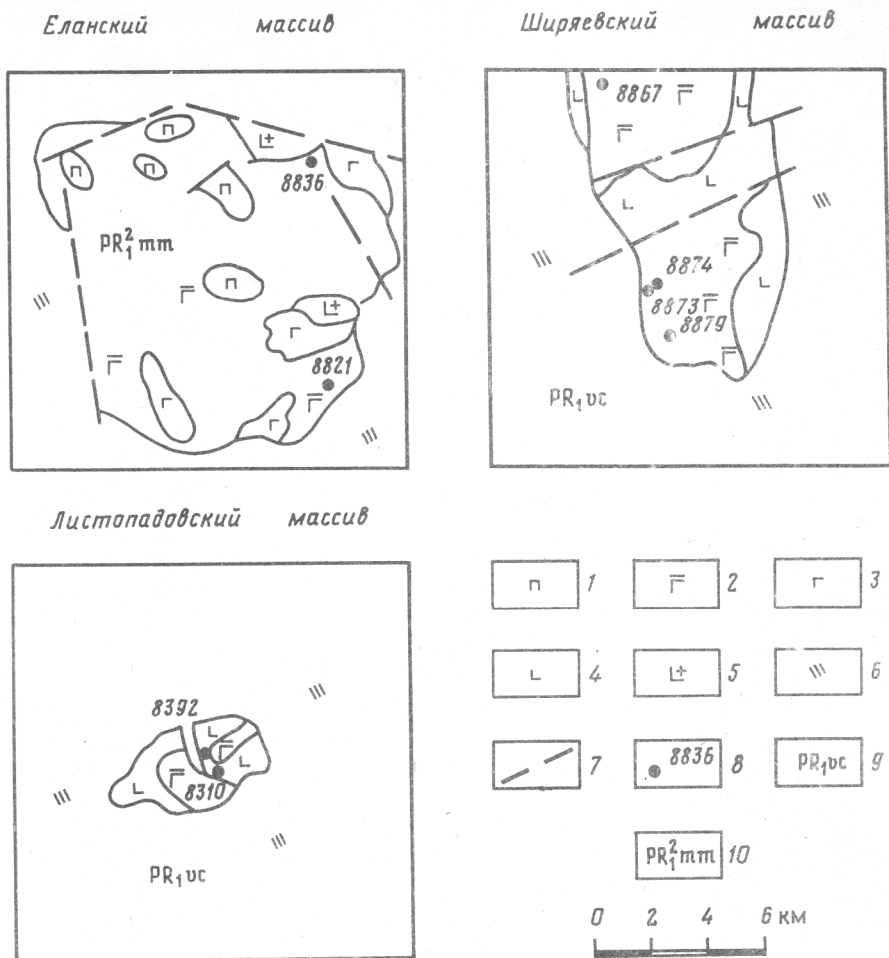


Рис. 1. Местоположение точек отбора ксенолитов в пределах интрузивных массивов. Интрузивные породы: 1 — перидотиты, 2 — габбронориты, 3 — нориты, 4 — диориты, 5 — кварцевые диориты, 6 — осадочно-метаморфические породы; 7 — разрывные нарушения; 8 — местоположение и номера скважин, из которых отобраны образцы ксенолитов; 9 — индекс воронцовской серии; 10 — индекс мамонского комплекса

породами для первых двух образцов в табл. 1 являются меланократовые оливиновые габбронориты Еланского плутона, для обр. 3—12 (табл. 1) габброиды Ширяевского и для 12—15 роговообманковые диориты Листопадовского.

### Петрографическое описание ксенолитов

Ксенолиты метапелитов превращены в роговики, обычно мелкозернистые, реже среднезернистые с гранобластовыми и порфиробластовыми структурами. Как видно из табл. 1, почти половина минеральных ассоциаций ксенолитов в габброноритах не содержит кварца, в других его количество очень незначительно, что указывает на их сильную десиликацию основным расплавом. В них также полностью отсутствует калиевый полевой шпат. Ксенолиты в диоритах всегда характеризуются присутствием кварца и часто калиевого полевого шпата.

Гранаты в ксенолитах могут иметь различные размеры в зависимости от реакционных структур, наблюдаемых в шлифах. Обычно они представлены крупными (до 3—5 мм) эвгдральными и субгдральными кристаллами. Отмечаются

## Минеральные ассоциации в ксенолитах метapelитов

№ образца	Q	Pl	Kfs	Bt	Grt	Cor	Sill	and
8821/517,3	-	-	-	+	-	+	-	-
8836/491,3	-	+	-	+	+	+	(+)	-
8867/413,3	+	+	-	+	+	+	-	-
8867/476,3	+	+	-	+	+	+	-	-
8873/475,5	+	+	-	+	+	-	+	+
8874/311,2	-	+	-	+	+	+	-	-
8874/303,4	-	+	-	+	+	+	-	-
8874/313,8	+	+	-	+	+	+	-	-
8874/316,6	+	+	-	+	+	+	-	-
8874/537,3	+	+	-	+	+	+	+	-
8879/389,4	-	+	-	+	+	+	-	-
8310/510	+	+	-	+	+	+	-	-
8310/492,3	+	+	-	+	+	+	+	-
8310/493	+	+	+	+	+	-	-	-
8392/449,7	+	+	+	+	+	-	-	-

№ образца	Hyp	Sp	Ram	Po	Ilm	Ms	St
8821/517,3	+	+	-	+	-	-	-
8836/491,3	+	(+)	-	+	-	-	-
8867/413,3	+	-	(.)	+	+	-	-
8867/476,3	+	-	+	+	+	-	-
8873/475,5	-	-	-	+	+	(.)	-
8874/311,2	+	+	-	+	+	-	(+)
8874/303,4	+	-	(.)	+	+	-	-
8874/313,8	-	(+)	+	+	+	-	-
8874/316,6	+	-	(.)	+	+	-	-
8874/537,3	+	(+)	-	+	+	-	-
8879/389,4	+	-	-	+	+	-	-
8310/510	-	-	-	+	-	-	-
8310/492,3	-	-	-	+	-	-	-
8310/493	-	-	-	-	-	-	-
8392/449,7	-	-	-	-	-	-	(+)

Примечания: + — присутствует; (+) — присутствует только во включениях; — — отсутствует; (.) — вторичный

также сильно резорбированные «скелетные» гранаты. Мелкие (до 1 мм) идиоморфные гранаты отмечаются в участках, где биотит замещается ромбическим амфиболом. Некоторые гранаты в обр. 8867/413,3, 8874/311,2, 8874/313,8, 8874/303,4 окаймляются кордиеритом. Очень интересен крупный идиоморфный кристалл граната из обр. 8879/389,4, имеющий зональное строение. Его центральная часть гомогенна, а каймы насыщены цепочкой включений биотита и ограничения граната трассируются выделениями ильменита. Гранат из обр. 8836/491,3 содержит включение, состоящее из силлиманита и зеленой шпинели. В некоторых образцах крупные гранаты частично окаймляются плагиоклазом.

Кордиерит является очень распространенной фазой и присутствует в большинстве образцов. В обр. 8821/517,3 и 8879/389,4 кордиерит является преобладающим минералом и его полигональными кристаллами сложен матрикс, в котором присутствуют шпинель и гиперстен (обр. 8821/517,3) или гранат и гиперстен (обр. 8879/389,4). В других образцах кордиерит может принимать участие в

реакционных структурах: каймы кордиерита по гранату, кордиеритовые или кордиерит-шпинелевые каймы между биотитом и силлиманитом. В отличие от регионально метаморфизованных силлиманит-кордиеритовых гнейсов [7] в кордиерите из роговиков почти всегда наблюдаются лимонно-желтые плеохроичные дворики.

Гиперстен представлен субгедральными кристаллами, реже порфиробластовыми выделениями, обычно ассоциированными с кордиеритом. Довольно редко гиперстен имеет непосредственные контакты с гранатами. Среди реакционных структур установлены прогрессивная реакция замещения биотита гиперстеном и ретроградное замещение гиперстена ромбическим амфиболом, причем последний часто образует каймы вокруг него. Иногда в гиперстене присутствуют включения биотита.

Биотит присутствует во всех образцах, но в ксенолитах в габброноритах в очень небольших количествах. Он постоянно обнаруживает признаки разложения и замещения другими железо-магнезиальными силикатами (гиперстеном, кордиеритом, гранатом, ромбическим амфиболом). Эти замещения иногда сопровождаются выделением ильменита по трещинам спайности в биотите. В обр. 8873/475,5 биотит частично замещается ретроградным мусковитом.

Ромбический амфибол, представленный промежуточным членом ряда жедрит-антофиллит, образует как удлиненно-призматические, так и неправильной формы кристаллы, но всегда с хорошо выраженной спайностью. В шлифах он встречается только в реакционных взаимоотношениях с гиперстеном и биотитом.

Зеленая шпинель довольно часто встречается в минеральных ассоциациях ксенолитов метапелитов. Обычно это мелкие кристаллы, заключенные в кордиерите или гранате. В обр. 8821/311,2 шпинель образует довольно крупные идиоморфные кристаллы, «плавающие» в матриксе кордиерита.

Ставролит встречен в одном ксенолите из габброноритов (обр. 8874/311,2). Два мелких зерна ставролита заключены в кордиерите вместе со шпинелью. Очевидно, что этот ставролит реликтовый.

Силлиманит встречается довольно редко и преимущественно во включениях в кордиерите или гранате. В обр. 8873/475,5 и 8310/492,3 он является равновесной фазой матрикса. Андалузит, встреченный в одном образце, присутствует, по-видимому, как метастабильно сохранившаяся фаза.

Калиевый полевой шпат, установленный только в двух ксенолитах в диоритах, представлен микроклином.

Плаггиоклаз присутствует почти во всех ксенолитах, преимущественно полисинтетически сдвойникован и представлен чаще всего таблитчатыми, редко удлиненно-призматическими кристаллами.

### Химические составы минералов

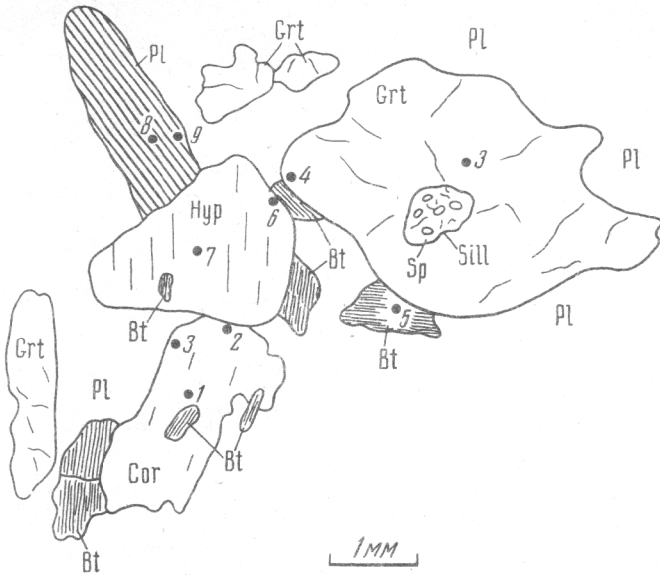
Было проанализировано три образца ксенолитов: два из габро-норитов и один из диоритов. Результаты анализов приведены в табл. 2, зарисовки участков шлифов и точки анализов на рис. 2.

Гранаты были проанализированы во всех трех образцах и имеют приблизительно одинаковую железистость ( $Fe/(Fe+Mg)=73-79\%$ ) и низкую марганцовистость (содержание  $MnO$  не превышает 1%). Зональность гранатов по магнию и железу почти не проявлена и только в гранате из обр. 8873/475,5 в краевой зоне отмечается увеличение железистости. Также отсутствует зональность по кальцию. Во всех проанализированных гранатах отмечается небольшое увеличение содержания марганца от центра к краю кристаллов.

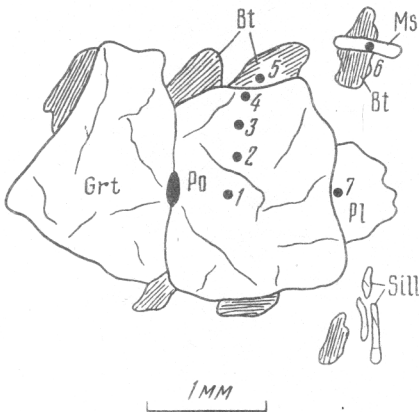
Гиперстен, проанализированный в обр. 8836/491,3, имеет железистость 49—51% и характеризуется ее наибольшим увеличением к краю кристалла. Он содержит 2—2,9%  $Al_2O_3$ , его количество также несколько возрастает к краю.

Кордиерит из обр. 8836/491,3 характеризуется железистостью 29% и отсутствием

Обр. 8836/491,3



Обр. 8873/475,5



Обр. 8310/510,0

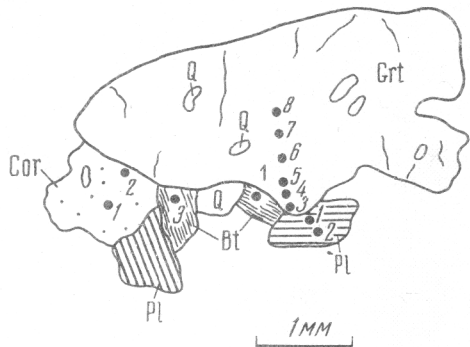


Рис. 2. Зарисовки участков шлифов ксенолитов метапелитов и точки микрзондовых анализов

зональности. В обр. 8310/510 он имеет бóльшую железистость ( $Fe/(Fe+Mg) = 33-35\%$ ), которая несколько увеличивается к краю кристалла.

Биотиты из обр. 8836/491,3 и 8310/510 высокотитанистые ( $TiO_2 = 3,65-4,80\%$ ), что намного выше, чем в биотитах из любой зоны регионально-метаморфизованных метапелитов. Более низкое содержание титана в биотите из обр. 8873/475,5 объясняется его перекристаллизацией после пика метаморфизма при спаде температуры. Железистость 42,0, 46—49 и 52% соответственно. Следовательно, наиболее магниевые биотиты отмечаются в ассоциациях с гиперстеном.

Максимальная основность плагиоклаза также отмечена в обр. 8836/491,3 в гиперстеносодержащем парагенезисе ( $Pl_{43-46}$ ). Он имеет слабо выраженную зональность с увеличением содержания  $CaO$  к кайме кристалла. Несколько менее кальциевый и незональный плагиоклаз встречен в обр. 8310/510 ( $Pl_{32}$ ). Еще меньшей основностью характеризуется плагиоклаз из обр. 8873/475,5 ( $Pl_{20}$ ).

Таблица 2

Химические составы и кристаллохимические коэффициенты минералов из ксенолитов метабазитов в интрузивных породах, мас.%

Компоненты	Образец 8310/510						
	Grt-3	Grt-4	Grt-5	Grt-6	Grt-7	Grt-8	Vt-1
SiO <sub>2</sub>	37,79	37,66	37,73	37,77	38,32	38,14	37,30
TiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	3,65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,21	21,88	22,37	22,32	21,95	22,13	19,07
FeO	31,35	32,43	32,15	32,83	32,01	32,13	16,69
MgO	6,08	6,28	6,21	6,00	6,38	6,19	10,98
MnO	0,60	0,25	0,55	—	0,34	—	—
CaO	1,08	1,19	1,00	1,11	1,08	1,21	0,33
Na <sub>2</sub> O	—	—	—	—	—	—	0,32
K <sub>2</sub> O	—	—	—	—	—	—	8,91
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0,27	—	—	—	0,30	—
Сумма	100,11	99,96	100,01	100,03	100,08	100,10	97,25
Кристаллохимические коэффициенты							
Si	2,96	2,96	2,97	2,97	3,01	3,00	2,81
Ti	—	—	—	—	—	—	0,21
Al <sub>IV</sub>	2,14	2,03	2,07	2,07	2,07	2,05	1,69
Al <sub>IV</sub> <sup>IV</sup>	—	—	—	—	—	—	1,19
Al <sup>VI</sup>	—	—	—	—	—	—	0,50
Fe	2,06	2,11	2,11	2,16	2,10	2,11	1,05
Mg	0,71	0,74	0,73	0,70	0,75	0,73	1,23
Mn	0,04	0,02	0,04	—	0,02	—	—
Ca	0,09	0,10	0,08	0,09	0,09	0,09	0,03
Na	—	—	—	—	—	—	0,05
K	—	—	—	—	—	—	0,86
Cr	—	0,02	—	—	—	0,02	—
Fe/(Fe+Mg), %	74,3	74,1	74,4	75,4	73,8	74,4	46,0

Компоненты	Образец 8310/510					Образец 8836/491.3		
	Vt-3	Pl-1	Pl-2	Cor-1	Cor-2	Vt-5	Pl-8	Pl-9
SiO <sub>2</sub>	36,46	59,76	60,26	49,61	49,23	36,70	57,2 <sup>1</sup>	55,53
TiO <sub>2</sub>	4,80	—	—	—	—	3,77	—	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,49	25,56	25,24	33,37	33,99	16,64	27,0 <sup>1</sup>	27,94
FeO	17,51	0,28	—	7,70	7,81	16,88	—	—
MgO	10,12	0,30	—	8,42	8,14	13,10	—	—
MnO	—	—	—	—	—	—	—	—
CaO	0,25	6,54	6,77	—	0,12	0,41	8,98	9,82
Na <sub>2</sub> O	0,95	7,59	7,78	0,67	—	0,79	6,66	5,29
K <sub>2</sub> O	8,98	—	—	—	—	8,54	—	0,15
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	—	0,81	—	—	—
Сумма	97,56	100,03	100,05	99,77	100,10	96,83	99,93	99,73

Таблица 2 (продолжение)

Компоненты	Образец 8310/510					Образец 8836/491,3		
	Вт-3	Pl-1	Pl-2	Cor-1	Cor-2	Вт-5	Pl-8	Pl-9
Кристаллохимические коэффициенты								
Si	2,79	2,66	2,86	5,00	4,98	2,77	2,56	2,49
Ti	0,28	—	—	—	—	0,21	—	—
Al <sup>VI</sup>	1,67	1,34	1,32	3,96	4,05	1,48	1,43	1,48
Al <sup>IV</sup>	1,21	—	—	—	—	1,23	—	—
Al <sup>IV</sup>	0,46	—	—	—	—	0,25	—	—
Fe	1,12	0,01	—	0,65	0,66	1,07	—	—
Mg	1,15	0,02	—	1,26	1,23	1,47	—	—
Mn	—	—	—	—	—	—	—	—
Ca	0,02	0,31	0,32	—	0,01	0,03	0,43	0,47
Na	0,14	0,66	0,67	0,13	—	0,12	0,49	0,55
K	0,88	—	—	—	—	0,82	—	0,01
Cr	—	—	—	—	0,07	—	—	—
Fe/(Fe+Mg),%	49,3	—	—	33,9	35,0	42,1	—	—
Ca/(Na+Ca)	—	0,32	0,32	—	—	—	0,42	0,46

Компоненты	Образец 8836/491,3						
	Crt-3	Grt-4	Hyp-6	Hyp-7	Cor-1	Cor-2	Cor-3
SiO <sub>2</sub>	37,85	37,19	47,14	49,75	49,18	49,92	50,05
TiO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	—
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,62	21,23	2,87	2,05	33,61	33,83	33,92
FeO	32,04	33,04	30,00	29,98	7,10	6,81	6,83
MgO	6,59	6,54	15,92	17,32	9,77	9,26	9,28
MnO	0,67	0,87	0,61	—	—	—	—
CaO	1,02	0,88	—	0,21	0,15	—	—
Na <sub>2</sub> O	—	—	—	—	—	—	—
K <sub>2</sub> O	—	—	—	—	—	0,21	—
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	3,17	0,51	—	—	—
Сумма	99,79	99,75	99,71	99,82	99,81	100,03	100,08

Кристаллохимические коэффициенты							
Si	2,98	2,94	1,84	1,92	4,94	5,01	5,02
Ti	—	—	—	—	—	—	—
Al	2,00	1,98	0,13	0,09	3,98	4,00	4,01
Fe	2,11	2,18	0,98	0,97	0,60	0,57	0,57
Mg	0,77	0,77	0,93	1,00	1,46	1,39	1,39
Mn	0,05	0,06	0,02	—	—	—	—
Ca	0,09	0,07	—	0,01	0,02	—	—
Na	—	—	—	—	—	—	—
K	—	—	—	—	—	0,03	—
Cr	—	—	0,10	0,02	—	—	—
Fe/(Fe+Mg),%	73,3	73,9	51,4	49,3	29,1	29,1	29,1

Таблица 2 (окончание)

Компоненты	Образец 8873/475.5						
	Grt-1	Grt-2	Grt-3	Grt-4	Pb-7	Bt-5	Ms-6
SiO	36,96	37,00	37,97	37,80	62,44	34,69	45,11
TiO <sub>2</sub>	0,48	0,18	0,17	0,17	—	1,35	0,35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32,06	21,55	21,28	21,75	22,53	18,98	34,85
FeO	33,44	33,18	33,11	33,93	—	19,47	0,98
MgO	6,13	5,31	6,18	4,99	—	10,08	0,40
MnO	1,11	1,11	1,03	1,64	—	—	—
CaO	1,27	1,29	1,26	1,20	4,21	0,04	0,01
Na <sub>2</sub> O	—	—	—	—	9,15	—	1,19
K <sub>2</sub> O	—	—	—	—	0,16	9,00	9,34
Сумма	101,45	99,62	101,00	101,48	98,49	93,61	92,23

## Кристаллохимические коэффициенты

Si	2,89	2,95	2,98	2,97	2,80	2,86	3,43
Ti	0,03	0,01	0,01	0,01	—	0,08	0,02
Al <sup>IV</sup>	2,03	2,02	1,97	2,01	1,19	1,84	3,12
Al <sup>V</sup>	—	—	—	—	—	1,02	—
Al <sup>VI</sup>	—	—	—	—	—	0,82	—
Fe	2,19	2,21	2,17	2,23	—	1,34	0,06
Mg	0,72	0,63	0,72	0,58	—	1,24	0,05
Mn	0,07	0,08	0,07	0,11	—	—	—
Ca	0,11	0,11	0,11	0,10	0,20	—	—
Na	—	—	—	—	0,80	—	0,17
K	—	—	—	—	0,01	0,94	0,91
Fe/(Fe+Mg),%	75,3	77,8	75,0	79,2	—	52,0	—
Ca/(Na+Ca)	—	—	—	—	0,20	—	—

*Примечание.* Цифры около названий минералов в таблице соответствуют номерам точек анализов на рис. 2.

Анализы выполнены на микрозонде Камебакс (ВСЕГЕИ), оператор Т.Д. Липатникова. Прочерк — содержание компонента не установлено.

## Интерпретация минеральных равновесий

Для рассмотрения фазовых отношений в ксенолитах необходимо знать, как изменялись интенсивные параметры при термальном метаморфизме. Наиболее простым вариантом кажется следующая модель. Интрузия габброноритов внедрялась в расплавленном состоянии и захватывала ксенолиты боковых пород, представленных среднетемпературными метапелитами. При захвате и движении вместе с магматическим расплавом вверх ксенолиты подверглись сильному термальному воздействию при одновременном спаде давления (декомпрессия). Скорость этой декомпрессии зависела от скорости внедрения, но в любом случае уменьшение давления было очень быстрым. Температура магматического расплава могла несколько понижаться при движении, но несомненно оставалась более высокой, чем температура предшествовавшего регионального метаморфизма. По времени температурное воздействие приблизительно соответствует продолжительности внедрения интрузии и по сравнению с региональным метаморфизмом представляет собой очень короткий эпизод. Изменения минеральных равновесий в ксенолитах метапелитов вследствие термального воздействия магматических пород приведены на рис. 3.



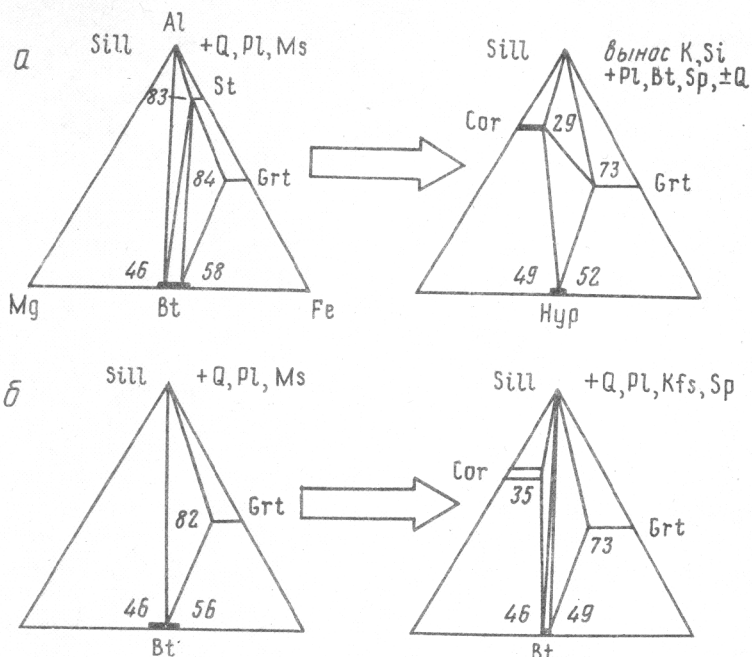


Рис. 3. Изменение минеральных парагенезисов ксенолитов по сравнению с вмещающими метапелитами  
*a* — ксенолиты метапелитов в габброноритах, *б* — ксенолиты в диоритах

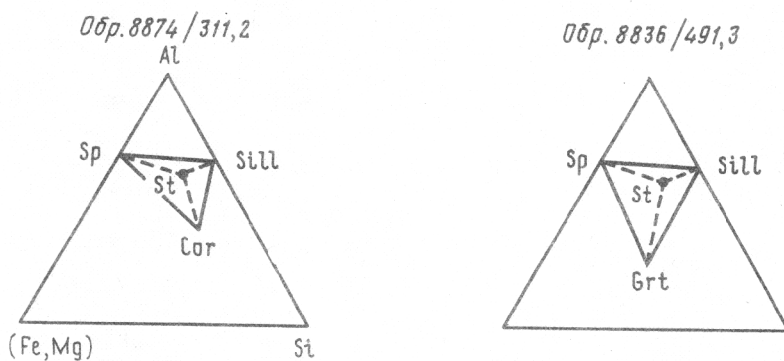


Рис. 4. Структуры прогрессивного замещения ставролита в ксенолитах метапелитов

Особенностью изученных ксенолитов в габброноритах является отсутствие кварца почти в половине их, а в оставшихся он присутствует в очень небольших количествах, хотя в окружающих интрузии метапелитах он всегда в избытке. По-видимому, это объясняется десиликацией ксенолитов вмещающими их основными породами, которые по сравнению с метапелитами недосыщены кремнеземом. Степень десиликации различна. Например, она максимальна в обр. 8821/517,3, где отсутствует даже плагиоклаз, и основная масса ксенолита сложена кордиеритом, в котором присутствуют зерна гиперстена и шпинели. Десиликация является обычной в гранулитовых комплексах [2] и может быть проявлена в контактовых ореолах [10].

Изменения минеральных парагенезисов ксенолитов в результате термального воздействия основного магматического расплава по сравнению с вмещающими

интрузии метапелитами приведены на рис. 3,а. Во всех ксенолитах в габброноритах, исключая обр. 8873/475,5, присутствуют гиперстен и (или) ромбический амфибол, в то время когда ни в одном из них не установлен калиевый полевой шпат, т.е. они являются недосыщенными калием породами. В окружающих интрузии метапелитах недосыщенные калием породы отсутствуют. Несмотря на то, что, судя по парагенезисам, метапелиты в ксенолитах недосыщены калием, признаков типичных для них прогрессивных реакций не наблюдается, а присутствующий ромбический амфибол в основном ретроградно замещает гиперстен. Этот факт, а также то, что отмечаются очевидные структуры замещения биотита гиперстеном, кордиеритом, гранатом и ромбическим амфиболом, не сопровождающиеся появлением калиевого полевого шпата, свидетельствуют о выносе калия из ксенолитов во вмещающие габбронориты, которые по сравнению с метапелитами также недосыщены калием, как и кремнеземом. По этой причине прогрессивные реакции, связанные с разложением биотита, происходили с выносом калия.

При термальном воздействии магматического расплава в ксенолитах протекали прогрессивные метаморфические реакции. В обр. 8836/491,3 гранат в центре содержит включения силлиманита и шпинели, которые можно интерпретировать как результат реакции:



которой подобные структуры ранее объясняли некоторые петрологи [2, 9, 13].

В обр. 8874/311,2 крупный кристалл кордиерита содержит включения ставролита в шпинели, поэтому предполагается, что имела место реакция



Возможность протекания этих реакций хорошо иллюстрируется на диаграмме (FeMg)—Al—Si (рис. 4). Интересно, что первая реакция не отмечалась в регионально-метаморфизованных пелитах, а вторая если и имела место, то включения ставролита в кордиерите никогда не обнаруживались. Это, вероятно, обусловлено быстрым и сильным прогревом и дегидратацией ксенолитов, в результате чего при разложении ставролита не могли образовываться водосодержащие минералы (например, биотит). Сохранившиеся реликты ставролиты в кордиерите указывают, что термальное воздействие было кратковременным с последующим быстрым охлаждением, и ставролит не успел полностью разложиться.

Каймы кордиерита вокруг граната обусловлены реакцией



Интересно, что в ксенолитах очень редко присутствует силлиманит, обычно заключенный в кордиерите, что является результатом этой же реакции, которая с уменьшением давления смещается вправо [3, 8, 14, 15].

Очень частое присутствие шпинели в кордиерите в безкварцевых породах можно также объяснить реакцией



Несмотря на то что гиперстен почти всегда присутствует в ксенолитах, объяснить его образование довольно сложно. С одной стороны, в отсутствие калиевого полевого шпата его появление должно происходить за счет ромбического амфибола, как предполагалось С.П. Кориковским [1], для метапелитов недосыщенных калием:  $\text{Gedg} = \text{Hyp} + \text{Cor} + \text{H}_2\text{O}$ . Однако структурные признаки этой реакции нигде не отмечались, а ромбический амфибол принимает участие только в ретроградных замещениях гиперстена. С другой стороны, совершенно очевидно замещение биотита гиперстеном, которое не сопровождается образованием калиевого полевого шпата. Поэтому реакция замещения биотита гиперстеном происхо-

дит с выносом калия во вмещающие породы, а высвобождающийся  $Al_2O_3$  будет входить в одновременно образующийся кордиерит



что подтверждается постоянной ассоциацией  $Hup + Cor$  в ксенолитах метапелитов в габброноритах. В них также отмечаются структуры замещения биотита ромбическим амфиболом с выделением мелких зерен граната на месте реакции, в результате которой также происходит вынос калия:



Эти две реакции могли сопровождаться образованием ильменита за счет титана, который высвобождался из разлагающегося биотита. В шлифах это выглядит как появление ильменита по трещинам спайности замещаемого биотита.

Возможно, что образование гиперстена могло также происходить в результате метаморфических реакций  $Grt + Q = Hup + Cor$  и  $Grt + Q = Pl + Hup$ , смещающейся вправо при уменьшении давления [5], однако характерных реакционных структур, как плагиоклаз-гиперстеновые симплектиты или кордиерит-гиперстеновые каймы вокруг граната не наблюдались. К тому же гранат в ксенолитах имеет гораздо большую железистость, чем гиперстен или кордиерит.

После кристаллизации магматического расплава происходило, по-видимому, быстрое остывание и активизация миграции флюидов. Спадом температуры после кристаллизации обусловлено ретроградное замещение гиперстена ромбическим амфиболом. Интересно, что это наблюдается только в тех ксенолитах, где еще сохранилось какое-то количество кварца. Все изложенное хорошо согласуется с реакцией



Возможно, в левой части этого равновесия принимает участие небольшое количество кордиерита. Подобным образом объясняли ретроградное замещение К. Бухер-Нурминен и Ж. Друп при диафторезе гранулитов в Пенинских Альпах [9].

Для ксенолитов в диоритах не характерен вынос  $SiO_2$  и  $K_2O$ , так как по содержанию этих компонентов состав метапелитов примерно соответствует диориту-гранодиориту. Минеральные изменения ксенолитов метапелитов при термальном воздействии диоритового расплава не так велики по следующим причинам: 1) диоритовый расплав характеризуется меньшей температурой, чем габброноритовый; 2) окружающие диоритовый массив метапелиты метаморфизованы в условиях мусковит-силлиманитовой зоны, следовательно, перепад температур был не таким большим; 3) образцы ксенолитов отобраны в скважинах, пройденных в районе эндоконтакта диоритов и вмещающих метапелитов. Поэтому ксенолиты, по-видимому, не были захвачены на больших глубинах и вынесены на поверхность, а являются фрагментами вмещающих пород в кровле диоритовой интрузии.

Анализ парагенезисов ксенолитов в диоритах показал, что вследствие термального воздействия в них появились кордиерит и калиевый полевой шпат, которые отсутствуют во вмещающих интрузию метапелитах. Минеральные изменения обусловлены реализацией двух основных реакций:



Следовательно, в ксенолитах образовались парагенезисы, характерные для силлиманит-калишпат-кордиеритовой зоны (см. рис. 3,б), которая отсутствует в метаморфической зональности в районе Листопадовского диоритового массива (см. рис. 1). Однако температуры разложения биотита с образованием парагенезисов  $Crt + Cor + Kfs$  или  $Hup + Kfs$  достигнуты не были.

Таблица 3

Температурные условия метаморфизма, определенные по гранат-биотитовому термометру

№ образца	Гранат-биотитовая пара	Температура, °С		
		Перчук [4]	Ферри, Спир [11]	Томпсон [17]
8836/491,3	Grт(4)—Bt(5)	655	706	683
8310/510	Grт(3)—Bt(1)	687	775	731
8310/510	Grт(8)—Bt(3)	725	857	787
8873/475,5	Grт(4)—Bt(5)	670	741	708

Примечание. К табл. 3 и 4. Температуры рассчитаны для  $P=3000$  бар. Цифры в скобках около названий минералов, соответствуют номерам точек анализов в табл. 2 и на рис. 2.

Таблица 4

Температурные условия метаморфизма, определенные по гранат-кордиеритовому термометру

№ образца	Гранат-кордиеритовая пара	Температура, °С		
		Перчук, Лав-рентьева [16]	Томпсон [17]	Холдзвэй, Ли [12]
8836/491,3	Grт(3)—Cor(1)	652	715	693
8836/491,3	Grт(4)—Cor(2)	641	703	683
8310/510	Grт(8)—Cor(1)	712	781	748
8310/510	Grт(3)—Cor(2)	718	795	760

### Геотермометрия

Температура перекристаллизации и образования новых минеральных парагенезисов в ксенолитах определялась по известным гранат-биотитовым [4, 11, 17], гранат-кордиеритовым [12, 16, 17] геотермометрам. Результаты термометрии для ксенолитов приведены в табл. 3 и 4. Эти данные позволяют выбрать приемлемый интервал значений термального метаморфизма ксенолитов. Он оценивается как  $650-750^{\circ}$ . Максимальные температуры не так велики, как ожидалось, но это может быть обусловлено изменением составов минеральных фаз при последующем охлаждении.

Автор благодарит геолога Воронежской геолого-геофизической экспедиции М.В. Копейкину, которая любезно предоставила некоторые образцы ксенолитов, и доктора геолого-минералогических наук С.П. Кориковского (ИГЕМ РАН) за плодотворное обсуждение полученных результатов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кориковский С.П. Влияние глубинности на парагенезисы недосыщенных  $K_2O$  высоко глиноземистых метапелитов // Очерки физико-химической петрологии. Вып. 2. М.: Наука, 1970. С. 59—87.
2. Кориковский С.П. Фации метаморфизма метапелитов. М.: Наука, 1979. 261 с.
3. Перчук Л.Л. Термодинамический режим глубинного петрогенеза. М.: Наука, 1973. 320 с.
4. Перчук Л.Л. Эволюция метаморфизма // Эксперимент в решении актуальных задач геологии. М.: Наука, 1986. С. 151—173.
5. Перчук Л.Л., Кицул В.А., Аранович Л.Я. и др. Петрология гранулитов Алданского щита. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 82 с.
6. Савко К.А. Региональный метаморфизм и металлогения юго-восточной части Воронежского кристаллического массива // Сов. геология. 1988. N 10. С. 83—89.

7. *Савко К.А.* Петрология метаморфических пород воронцовской серии востока Воронежского кристаллического массива: Автореф. дис...канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ, 1991. 15 с.
8. *Aranovich L.Ya., Podlesskii K.K.* The cordierite—sillimanitequartz equilibrium; experiments and applications // *Kynetics and Equilibrium in Mineral Reactions* / Ed. S.K. Saxena / 1983. P. 173—198.
9. *Bucher-Nurminen K., Droop G.* The metamorphic evolution of garnet-cordierite-sillimanite gneisses of the Gruf complex, easter Penine Alps // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1983. V. 84. P. 215—287.
10. *Engel S.* Contact metamorphism by the layered gabbro at Spatulate Ridge and Apostrophe Island, north Victoria Land, Antarctica // *Geol. Jahrb.* 1987. B. 66. P. 275—301.
11. *Ferry J.M., Spear F.S.* Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1978. V. 66. P. 113—117.
12. *Holdaway M.J., Lee S.M.* Fe-Mg cordierite stability in high grade pelitic rocks, based on experimental, theoretical and natural observations // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1977. V. 63. P. 175—188.
13. *Kwak T.A.P.* Natural staurolite breakdown reactions at moderate to high pressure // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1974. V. 44. P. 57—80.
14. *Martingole J., Sisi J.S.* Cordierite—garnet—H<sub>2</sub>O equilibrium: a geological thermometer, barometer and water fugacity indicator // *Contrib. Miner. Petrol.* 1981. V. 77. P. 38—46.
15. *Perchuk L.L.* Thermodynamical control of metamorphic processes // *Energetic of Geological Processes* (Ed. S.K. Saxena) 1977. P. 286—352.
16. *Perchuk L.L., Lavrent'eva I.V.* Experimental investigation of exchange equilibrium in the system cordierite—garnet—biotite // *Kynetics and Equilibrium in Mineral Reactions* (Ed. Saxena S.K.) 1983. P. 199—229.
17. *Thompson A.B.* Mineral reactions in pelitic rocks: Calculation of some P—T—X (Fe—Mg) phase relations // *Amer. J. of Science.* 1976. V. 276. N 4. P. 425—454.

Гос. геологическое предприятие  
«Воронежгеология», Воронеж

Поступила в редакцию  
29.05.91