

УДК 552.16

ГИПЕРСТЕНОВЫЕ РОГОВИКИ КАНДЫГАТАЙСКОГО КОМПЛЕКСА (ВОСТОЧНЫЙ КАЗАХСТАН)

© 2004 г. В. П. Сухоруков, А. В. Плотников

Представлено академиком В.В. Ревердатто 19.03.2004 г.

Поступило 01.04.2004 г.

Кандыгатайский метаморфический блок расположен в пределах Жарминской сдвиговой зоны, разделяющей структуры герцинид Зайсанской и каледонид Чингиз-Тарбагатайской складчатых систем. Метапелиты кандыгатайского комплекса уже рассматривались в литературе [1, 2]. На основании находки в породах комплекса минеральных ассоциаций гиперстена с силлиманитом, корунда с гранатом и гиперстена с клинопироксеном он был отнесен к гранулитам повышенных давлений ($T = 950\text{--}1000^\circ\text{C}$, $P = 10\text{--}12$ кбар [1]) и представлен в качестве уникального для региона выхода древнего сиалического фундамента [2]. В настоящем сообщении приведены новые петрологические данные, позволяющие отнести этот комплекс к образованиям высоких температур – низких давлений и предположить двухстадийную историю его формирования.

Кандыгатайский блок высокотемпературных метапелитов расположен в юго-западном эндоконтакте одноименного массива сиенитов и лейкократовых субщелочных гранитов ($P_1 - T$) и имеет размеры 200×4000 м (рис. 1). Граница с сиенитами носит интрузивный характер, в породах кандыгатайского метаморфического комплекса наблюдаются апофизы сиенитов мощностью до нескольких сантиметров. Контакт с ороговикованными вмещающими породами коконьской свиты (C_1) тектонический.

Образования кандыгатайского метаморфического комплекса представляют собой массивные мелкозернистые породы с роговиковой структурой (размер зерен в основной ткани порядка $0.01\text{--}0.1$ мм). Породы характеризуются отчетливой грубой и мелкой слоистостью (мощность слоев от первых миллиметров до десятков сантиметров) часто с тонким чередованием кордиерит-шпинелевых прослоев с прослоями, содержащими клинопироксен и роговую обманку.

По минеральному составу метапелиты комплекса представлены кордиерит-шпинель-силли-

манит-андалузитовыми с корундом, кордиерит-шпинель-гиперстен-корундовыми и кордиерит-гранатовыми породами. Помимо перечисленных минералов, во всех метапелитовых ассоциациях присутствуют калишпат, биотит, плагиоклаз, кварц и ильменит. Клинопироксен-роговообманковые прослои содержат биотит, плагиоклаз, калиевый полевой шпат, кварц, ильменит.

В метапелитах комплекса нами зафиксирован ряд минеральных взаимоотношений, позволяющих предположить протекание в породах метаморфических реакций. 1. Образование кордиерит-шпинелевых симплектитов вокруг зерен андалузита; в таких сростаниях андалузит представлен резорбированными зернами, окруженными широкой каймой кордиерита с включениями зеленой шпинели. 2. Образование гиперстеновых кайм вокруг чешуй биотита, вплоть до полного обрастания. 3. Замещение андалузита силлиманитом. В таких структурах силлиманит представлен длиннопризматическими кристаллами, имеющими субпараллельную ориентировку, а андалузит – мелкими неограненными зернами, расположенными вокруг силлиманита. Одинаковая оптическая ориентировка зерен андалузита в таких сростаниях свидетельствует о том, что это остатки отдельных монокристаллов. 4. Сростания граната с биотитом и кварцем, такие сростания характеризуются формированием мощной кварцевой каймы, часто с биотитом, вокруг кристаллов граната. Гранат-кварцевые сростания приурочены, как правило, к более лейкократовым и крупнозернистым участкам пород.

Эти наблюдения позволили нам, основываясь на экспериментальных и расчетных данных, оценить PT -условия формирования пород кандыгатайского комплекса. Характерной особенностью метапелитов комплекса является практически повсеместная распространенность в них андалузита в ассоциации с калишпатом. Эта ассоциация устойчива при давлении ниже 2.5 кбар [3, 4]. Свидетельством низких давлений (в области контактового метаморфизма) является также высокая железистость кордиерита (58%) в ассоциации с биотитом и шпинелью, что является характер-

Объединенный институт геологии, геофизики
и минералогии
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск

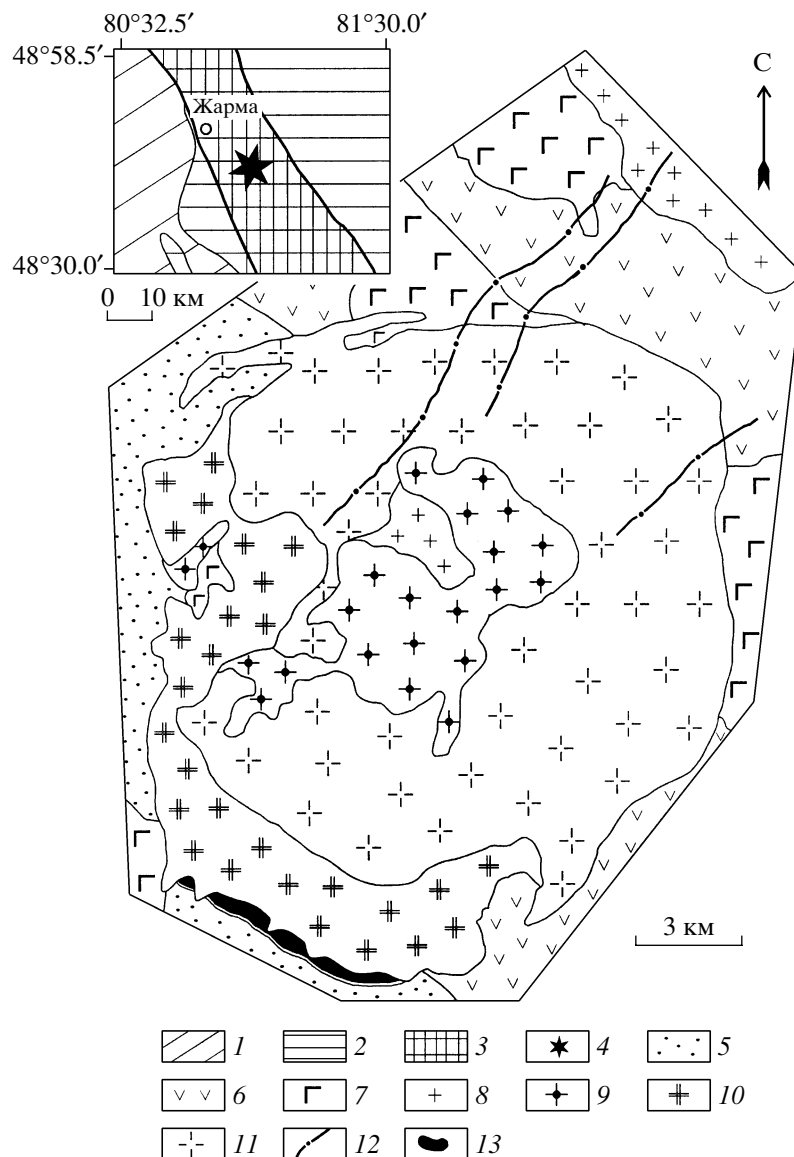


Рис. 1. Геологическая схема Кандыгатайского массива и его обрамления с указанием положения высокотемпературных метаморфических пород. Составлена с использованием материалов [11]. 1 – каледонский структурный комплекс; 2 – герцинский структурный комплекс; 3 – область перехода от каледонид к герцинидам Восточного Казахстана, где сосредоточены основные сдвиговые дислокации; 4 – Кандыгатайский блок метаморфических пород; 5, 6 – отложения нижнего карбона (C_1), ороговикованные в условиях амфибол- и мусковит-роговиковой фаций; 5 – терригенные отложения, 6 – вулканогенные отложения; 7 – саурская габбро-диорит-тоналитовая серия (C_1); 8, 9 – жарминская габбро-гранитовая серия (P_1); 8 – граниты, 9 – порфировидные граниты; 10–12 – кандыгатайский комплекс сиенитов и лейкократовых субщелочных гранитов ($P_2 - T$); 10 – биотит-гастингситовые сиениты и граносиениты, 11 – биотит-гастингситовые гранитоиды, 12 – послегранитовые дайки граносиенит-порфиров; 13 – Кандыгатайский блок высокотемпературных метапелитов.

ным для высокотемпературных роговиков умеренной железистости [5]. Широкое развитие в породах кандыгатайского метаморфического комплекса таких минеральных ассоциаций, как $And + Kfs$, $Crld + Kfs$, $Crn + Kfs$, $Hu + Kfs$ ¹, указывает на

¹ Здесь и далее приняты следующие сокращения минералов: And – андалузит, Bt – биотит, Crd – кордиерит, Crn – корунд, Grt – гранат, Hu – гиперстен, Kfs – калишпат, Pl – плагиоклаз, Qtz – кварц, Sil – силлиманит, Spl – шпинель.

высокие температуры (не менее 650°C при 2 кбар (рис. 2)) и считается характерным для пироксен-роговиковой фации метаморфизма [6]. Парагенезис $Crld + Hu + Kfs$ устойчив лишь в наиболее высокотемпературной ступени пироксен-роговиковой фации, при температурах не менее 780°C [7].

Наблюдаемые взаимоотношения минералов в метапелитах комплекса позволяют предполо-

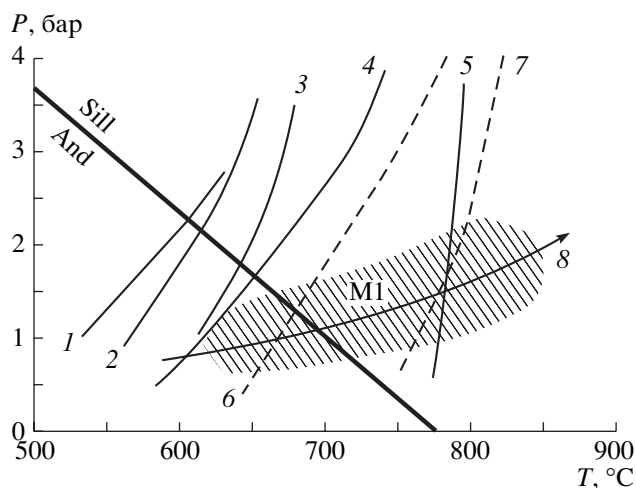


Рис. 2. *PT*-условия метаморфизма пород кандыгатайского метаморфического комплекса. Сплошными линиями показаны главные моновариантные равновесия по литературным данным, штриховыми – линии равновесий, рассчитанные для реальных составов минералов с использованием программы Thermocalc [9, 10]. Линия And–Sil по [4]. 1 – $Bt + Ms + Qtz = Crd + Kfs + H_2O$ [12], 2 – $Ms + Qtz = And + Kfs + H_2O$ [3], 3 – $Ms = Crn + Kfs + H_2O$ [13], 4 – $Bt + Qtz = Hy + Kfs + H_2O$ [12], 5 – $Bt + Grt + Qtz = Crd + Hy + Kfs$ [7], 6 – $And + Bt = Crd + Spl + Kfs$, 7 – $Bt + Qtz = Hy + Kfs + H_2O$, 8 – вероятная геотерма, обусловившая метаморфизм первого этапа.

жить протекание реакций: $And + Bt \rightarrow Crd + Spl + Kfs$, $Bt + Qtz \rightarrow Hy + Kfs + H_2O$, $And \rightarrow Sil$.

Линии соответствующих равновесий, построенные на основании реальных составов минералов (табл. 1), приведены на рис. 2. Линия условно моновариантного равновесия андалузита и биотита с железистостью 64% (Bt_1) с образованием кордиерит-шпинелевых симплектитов (обр. 98-23/44) проходит через точки $670^\circ C$ при 1 кбар и $750^\circ C$ при 3 кбар и имеет положительный наклон в *PT*-координатах. Эта реакция в сочетании с реакцией замещения андалузита силлиманитом (линия с отрицательным наклоном) может осуществляться только на стадии повышения температуры при постоянном давлении [7]. Линия равновесия биотита с кварцем с образованием гиперстена и калишпата, рассчитанная по реальным составам минералов (обр. 99-53/1), проходит через точки $760^\circ C$ при 1 кбар и $810^\circ C$ при 3 кбар.

Положение граната в лейкократовых более крупнозернистых обособлениях в породе, отдельно от корунд- и кордиеритсодержащих прослоев, позволяет предположить формирование граната не в парагенезисе с другими минералами метапелитов. Наличие кварцевой каймы, часто с биотитом (Bt_2), указывает на формирование таких агрегатов в более низкотемпературной области, чем ассоциация $Crd + Hy + Kfs$ (меньше $780^\circ C$) [7]; температура, рассчитанная с помощью гранат-

биотитового термометра [8], составляет $560^\circ C$ при 2 кбар. Основываясь на этих данных, можно предположить, что формирование граната могло быть связано с более поздним низкотемпературным метаморфизмом. Причиной повторного прогрева, возможно, могли быть сиениты кандыгатайского массива, под воздействием которых вмещающие породы коконьской свиты метаморфизованы в условиях мусковит- и амфибол-роговиковой фации [2], а в метаморфитах кандыгатайского комплекса воздействие сиенитов проявляется в виде многочисленных прожилков. Вероятно, с этим же этапом связано широкое развитие крупных, ограниченных зерен андалузита (And_2), часто окружающих кварц в корундсодержащих метапелитах. Основываясь на этих данных, можно предположить, что ассоциация граната с корундом, описанная А.П. Пономаревой [2], является неравновесной и не может служить доказательством повышенного давления при формировании пород. Такой же вывод можно сделать относительно ассоциаций гиперстена с силлиманитом и гиперстена с клинопироксеном, минералы которых присутствуют в породах комплекса, но встречаются в разных ассоциациях и никогда не образуют сростаний между собой. Сосуществование в пределах одного шлифа прослоев резко контрастного состава, по мнению авторов, также указывает на то, что породы комплекса не претерпевали глубокого метаморфизма, а контрастные прослои являются унаследованными от первичной осадочной слоистости пород. Участие андалузита в качестве исходного вещества в реакции, идущей на прогрессивной стадии, указывает на то, что параметры метаморфизма пород комплекса изначально отвечали области устойчивости андалузита в *PT*-координатах, т.е. породы кандыгатайского метаморфического комплекса никогда не были метаморфизованы в условиях повышенных давлений.

Для оценки максимальных температур и давлений формирования пород кандыгатайского комплекса были произведены расчеты с помощью программы Thermocalc V.3.1 с использованием соответствующих баз данных [9, 10]. Для расчетов использовалась наиболее высокотемпературная минеральная ассоциация метапелитов $Crd + Hy + Bt_1 + Kfs + Qtz$, составы минералов приведены в табл. 1. При расчетах были получены значения $T = 810 \pm 84^\circ C$, $P = 1.6 \pm 1.5$ кбар, что вполне согласуется с данными об устойчивости ассоциации $Crd + Hy + Kfs$ [7].

Основные выводы. Породы кандыгатайского метаморфического блока были сформированы в условиях высоких температур и низких давлений, в *PT*-области контактового метаморфизма. История формирования этих пород связана с двухэтапной эволюцией. Первый этап – метаморфизм высоких температур – низких давлений (максимальные параметры около $800^\circ C$ и 2 кбар), ха-

Таблица 1. Химические составы минералов метapelитов кандыгатайского комплекса

Компонент	99-53/1						98-23/44						98-23/44			
	Кордиерит	Гиперстен	Биотит	Плагиоклаз	Калишпат		Кордиерит	Биотит	Плагиоклаз	Калишпат	Ильменит	Компонент	Шпиль	Гранат		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	47.60	47.61	47.74	34.91	35.02	65.37	64.16	64.04	47.38	35.28	58.03	64.53	—	0.00	36.87	36.52
TiO ₂	0.00	0.32	0.25	5.21	1.17	—	—	0.00	0.00	3.78	—	0.00	53.34	0.27	—	—
Al ₂ O ₃	32.47	5.1	3.91	16.75	18.81	22.96	18.40	18.93	31.99	18.51	25.73	18.70	—	56.47	20.56	20.66
FeO	8.33	32.64	32.64	19.98	19.47	0.07	0.20	0.06	12.69	21.38	0.04	0.03	45.74	40.07	36.97	36.90
MgO	8.13	13.27	13.79	9.11	11.26	—	—	0.00	4.78	6.73	—	0.00	0.02	1.47	2.07	1.32
MnO	0.67	1.75	2.04	0.28	0.25	—	—	0.00	0.62	0.25	—	0.00	0.87	0.52	2.25	3.18
CaO	0.00	—	0.07	0.09	0.20	2.98	0.12	0.15	0.00	0.03	7.71	0.05	—	0.00	1.34	1.30
Na ₂ O	0.37	0.37	0.00	0.09	0.20	8.88	1.35	2.35	0.30	0.20	7.35	1.47	—	0.00	—	—
K ₂ O	0.06	0.06	0.00	9.88	9.79	0.27	14.48	13.39	0.00	9.66	0.20	14.08	—	0.00	—	—
Сумма	97.66	100.88	100.54	96.21	95.97	100.57	98.73	98.95	97.83	95.82	99.08	98.88	100.17	1.54	—	—
							Кристаллохимические формулы						Сумма	100.49	100.08	99.96
Si	4.964	1.856	1.869	5.487	5.368	2.852	2.989	2.969	5.045	5.610	2.621	2.991	—	—	—	—
Ti	—	0.009	0.007	0.616	0.135	—	—	—	—	0.452	—	—	1.009	—	2.997	2.952
Al(IV)	1.036	0.144	0.131	2.513	2.632	1.180	1.010	1.033	0.955	2.390	1.369	1.021	—	0.006	—	—
Al(VI)	2.952	0.091	0.049	0.587	0.763	—	—	—	3.056	1.076	—	—	—	—	—	—
Fe ²⁺	0.726	1.065	1.068	2.626	2.496	0.003	0.008	0.002	1.130	2.843	0.002	0.001	0.962	1.919	1.965	1.919
Mg	1.264	0.771	0.805	2.135	2.573	—	—	—	0.759	1.595	—	—	0.001	0.897	2.513	2.495
Mn	0.059	0.058	0.068	0.037	0.032	—	—	—	0.056	0.034	—	—	0.019	0.063	0.251	0.383
Ca	—	0.007	0.003	—	—	0.139	0.006	0.007	—	0.005	0.373	0.002	—	0.013	0.155	0.090
Na	0.075	—	—	0.027	0.059	0.751	0.122	0.211	0.062	0.062	0.644	0.132	—	—	0.117	0.113
K	0.008	—	—	1.981	1.914	0.015	0.861	0.792	—	1.960	0.012	0.833	—	—	—	—
						Минералы						К	—	—	—	
An						15.4					36.2			К	—	—
Ab						83.0	12.3	20.9			62.6	13.7		Zn	—	—
Or						1.7	87.1	78.4			1.2	86.1	1.00	Минералы		
F	0.36	0.58	0.57	0.55	0.49				0.60	0.64				Alm	82.8	81.0
														Prp	8.3	12.4
														Spss	5.1	2.9
														Grs	3.8	3.7
														F	0.91	0.87

Примечания. Минеральная ассоциация в образце 99-53/1: Ctd + Hy + Spl + Plm + Vt + Pl + Kfs + Qtz. 2 – центр зерна гиперстена, 3 – край зерна гиперстена, 4 – биотит в составе кордиеритовых симплектитов, 5 – реликтовый биотит (замещающий гиперстен). Минеральная ассоциация в образце 98-23/44: Ctd + Grt + Spl + Ctn + And1 + + Fibr + Vt + Plm + Rt + Pl + Kfs + Qtz. 15 – центр зерна граната, 16 – край зерна.

рактирующийся развитием ассоциаций метапелитов Crd + Spl + Sil + Crn + Kfs + Bt₁ и Crd + Spl + Nu + Crn + Kfs + Bt₁. Тепловым источником для формирования минеральных ассоциаций первого этапа могли быть габброиды саурской серии (C₁), широко распространенные в регионе и присутствующие в непосредственной близости от метапелитов кандыгатайского комплекса (рис. 1). Вторым этапом – контактовый метаморфизм, проходивший, по-видимому, под тепловым воздействием сиенитов кандыгатайского массива (560°C и 2 кбар), с которым связано появление ассоциации Grt + Bt₂ + Qtz и формирование And₂.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 02–05–65319.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов П.В., Паталаха Е.И., Ефимов И.А. и др. // Геотектоника. 1984. № 4. С. 61–74.
2. Пономарева А.П., Ермолов П.В., Майорова О.Н. // Тр. ин-та геологии и геофизики. 1985. В. 609. С. 88–95.
3. Chatterjee N.D., Johannes W. // Contribs. Mineral and Petrol. 1974. V. 48. P. 89–114.
4. Holdaway M.J., Mukhopadhyay B. // Amer. Miner. 1993. V. 78. P. 298–315.
5. Ревердатто В.В. Фации контактового метаморфизма. М.: Недра, 1970. 272 с.
6. Добрецов Н.Л., Ревердатто В.В., Соболев В.С. и др. Фации метаморфизма. М.: Недра, 1970. 432 с.
7. Кориковский С.П. Фации метаморфизма метапелитов. М.: Наука, 1979. 263 с.
8. Kleemann U., Reinhardt J. // Eur. J. Miner. 1994. V. 6. P. 925–941.
9. Holland T.J.B., Powell R. // J. Metamorph. Geol. 1990. V. 8. P. 89–124.
10. Holland T.J.B., Powell R. // J. Metamorph. Geol. 1998. V. 16. P. 309–343.
11. Ермолов П.В., Изох Э.П., Пономарева А.П. и др. Габбро-гранитные серии западной части Зайсанской складчатой системы. Новосибирск: Наука, 1977. 246 с.
12. Hoffert E., Grant J.A. // Contribs. Mineral. and Petrol. 1980. V. 73. P. 15–22.
13. Seifert F. // Contribs. Mineral. and Petrol. 1976. V. 57. P. 179–185.