

## СОСТАВ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ АНДАЛУЗИТ-КИАНИТ-СИЛЛИМАНИТОВЫХ ПЕГМАТОИДНЫХ ОБОСОБЛЕНИЙ В МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОДАХ ЦЭЛСКОГО БЛОКА (Монгольский Алтай)

**В.П. Сухоруков**

*Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия*

В пределах Цэлского метаморфического блока, относящегося к герцинскому поясу южного фланга Монгольского Алтая, в метаморфических породах установлены пегматоидные обособления, содержащие три полиморфные модификации  $Al_2SiO_5$ . При петрографическом изучении были установлены признаки последовательного замещения полиморфов в порядке: андалузит, кианит, фибролит, силлиманит. Изучение параметров метаморфизма вмещающих пород показало, что формирование минеральной ассоциации пегматоидных жил произошло в результате двух последовательных этапов метаморфизма: андалузит-силлиманитового и кианит-силлиманитового типов. В качестве наиболее вероятного механизма перехода  $Al_2SiO_5$  из одной полиморфной модификации в другую предположен механизм ионного обмена с участием мусковита.

*Полиморфные модификации  $Al_2SiO_5$ , полиметаморфизм, Монгольский Алтай.*

## COMPOSITION AND CONDITIONS OF FORMATION OF ANDALUSITE-KYANITE-SILLIMANITE PEGMATOID SEGREGATIONS IN METAMORPHIC ROCKS OF THE TSEL BLOCK

*(Mongolian Altai)*

**V.P. Sukhorukov**

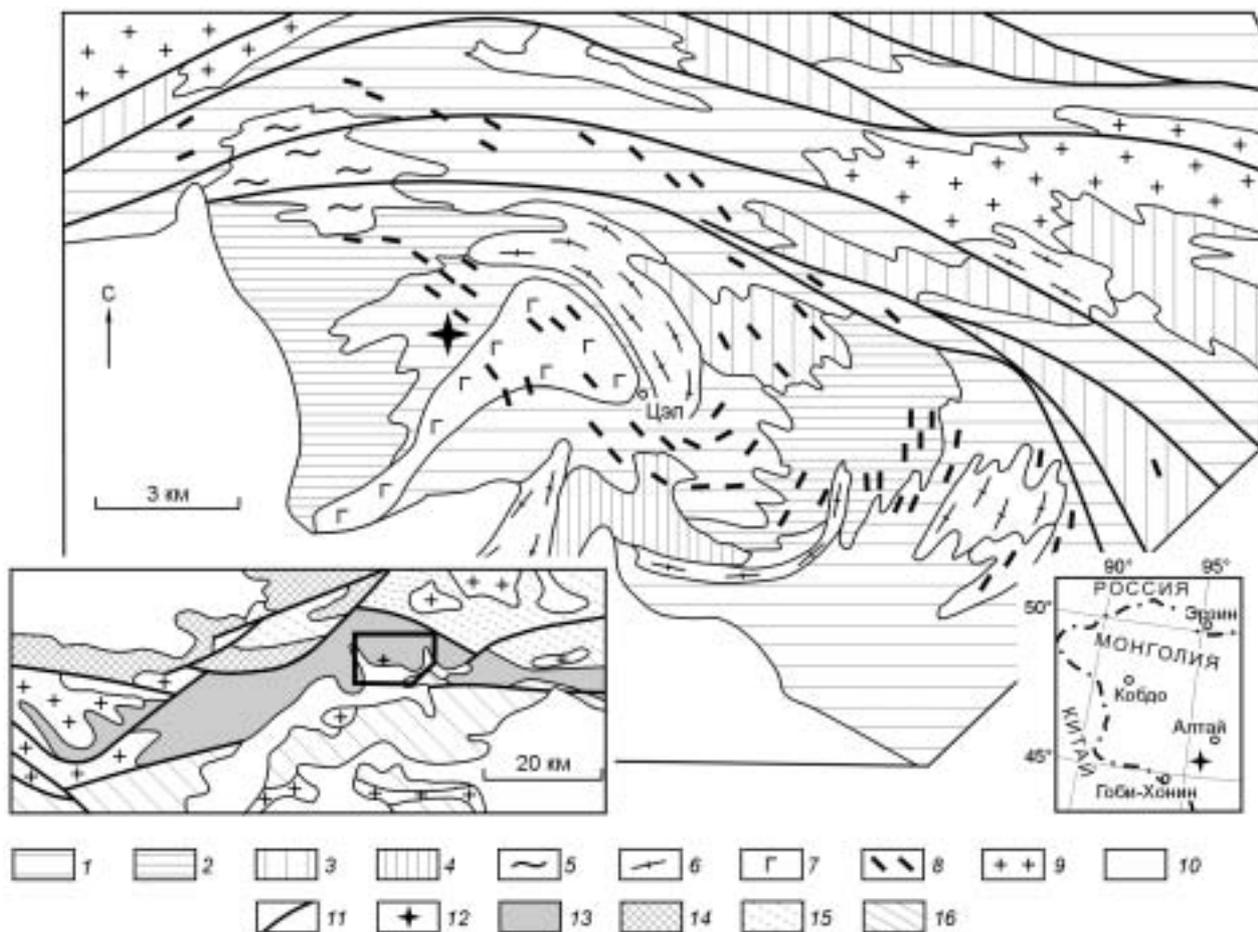
Pegmatoid segregations containing three polymorphous  $Al_2SiO_5$  modifications have been revealed in metamorphic rocks of the Tsel block localized in the Hercynian belt on the southern flank of Mongolian Altai. Petrographic study showed a successive substitution of polymorphs in the sequence: andalusite–kyanite–fibrolite–sillimanite. Estimated parameters of the host-rock metamorphism indicate that the mineral assemblage of pegmatoid veins formed at two successive stages of metamorphism: andalusite-sillimanite and kyanite-sillimanite. It is suggested that the transformation of  $Al_2SiO_5$  from one to another polymorphous modification occurs by the ion exchange mechanism with the participation of muscovite.

*Polymorphous modifications of  $Al_2SiO_5$ , polymetamorphism, Mongolian Altai*

## ВВЕДЕНИЕ

Кварцевые жилы и пегматоидные обособления, содержащие полиморфные модификации  $Al_2SiO_5$ , часто встречаются в метаморфических комплексах. Различные комбинации двух полиморфов  $Al_2SiO_5$  широко распространены в метапелитах, например андалузит + силлиманит и силлиманит + кианит [Kerrick, 1990; и др.]. Породы с тремя полиморфными модификациями наблюдаются значительно реже и могут быть образованы в результате последовательной кристаллизации в ходе прогрессивного метаморфизма, комбинации регионального и контактового метаморфизма или кристаллизоваться метастабильно [Kerrick, 1990; и др.]. Изучение жил, содержащих разные модификации силиката глинозема, может дать информацию о *PT*-условиях метаморфизма и характере изменения их во времени.

Цэлский блок расположен в бассейнах рек Цэлийн-Гол, Худжертин-Гол, Шарин-Гол и Дэрэсэтуин-Гол и входит в структуру герцинид южного фланга Монгольского Алтая. С севера он отделен глубинным разломом от вулканизов венда—нижнего кембрия, с запада срезается палеозойскими гранитоидами, на юге перекрыт кайнозойскими отложениями (рис. 1). Формирование метаморфических комплексов, по данным И.К. Козакова [1986], здесь было связано с несколькими этапами метаморфизма. Первый этап, датированный  $385 \pm 5$  млн лет [Бибикова и др., 1992], относится к андалузит-силлиманитовому типу и достигал уровня амфиболитовой, а в некоторых блоках гранулитовой фации [Козаков и др., 2002]. Он завершился формированием зон кислотного выщелачивания, характеризующих регрессивную стадию метаморфизма, и внедрением гранитоидов калиевого ряда. Второй этап метаморфизма кианит-силлиманитового типа имел место  $365 \pm 4$ — $371 \pm 2$  млн лет назад [Бибикова и др., 1992] и соответствует *PT*-параметрам амфиболитовой фации. В это время сформировались главные картируемые структуры региона — лежачие прямые складки северо-западного простирания, в которых в качестве реликтов сохраняются структуры раннего этапа. Завершаются метаморфические преобразования региональным метаморфизмом в температурных условиях фации зеленых сланцев. В интервале между высоко-



**Рис. 1. Геологическая схема восточной части Цэлского блока (по [Козаков и др., 2002], с изменениями).**

1—6 — цэлский мегакомплекс: 1 — биотитовые и двуслюдяные гнейсы, 2 — гранат-биотитовые гнейсы, 3 — биотитовые гнейсы с известково-силикатными прослоями, 4 — толща переслаивания гнейсов с известково-силикатными прослоями и мраморов, 5 — мигматит-граниты, 6 — гнейсограниты; 7 — метагаббро, амфиболиты, ассоциирующие с породами ультраосновного состава (массив Бурэн-Хаирхан); 8 — поля даек метадиабазов и метапорфиров гашунурского комплекса; 9 — раннескладчатые плагиограниты; 10 — четвертичные отложения; 11 — разломы; 12 — место обнаружения пегматоидных обособлений. На врезке: 13 — полиметаморфический комплекс Цэлского блока; 14, 15 — каледониды: 14 — ранние, 15 — поздние; 16 — герциниды Южно-Монгольской зоны.

низкоградиентным метаморфизмом происходит внедрение роев даек базитов гашунурского комплекса. В пределах Цэлского блока они представлены дайками порфиров и диабазов и отдельными телами слабодифференцированных основных—ультраосновных пород. Расслоенные интрузивы и секущие их дайки вместе с вмещающими породами рассланцованы, деформированы и метаморфизованы в условиях низов амфиболитовой фации умеренных давлений, о чем свидетельствует наличие в них граната, а также особенности состава амфибола [Байкова и др., 1992].

Пегматоидные обособления, содержащие полиморфные модификации  $Al_2SiO_5$ , обнаружены в районе западного контакта одного из самых крупных массивов основного состава Бурэн-Хаирхан (см. рис. 1). Вмещающими породами для них являются кристаллические сланцы, характеризующиеся минеральной ассоциацией  $Bt + Ms + St + Grt + Ky + Sil + And + Fibr + Pl + Qtz^*$ . Сланцы, в которых присутствуют все полиморфные модификации силиката глинозема, установлены в южном контакте массива Бурэн-Хаирхан. Андалузит в них представлен сильно резорбированными зёрнами, расположенными внутри чешуй мусковита или зёрен плагиоклаза. В западном контакте, где непосредственно обнаружены пегматоидные

\* Здесь и далее приняты следующие обозначения минералов: Grt — гранат, St — ставролит, Bt — биотит, Ms — мусковит, Pl — плагиоклаз, Qtz — кварц, And — андалузит, Ky — кианит, Sil — силлиманит, Fibr — фибролит.

обособления, из полиморфов  $Al_2SiO_5$  присутствует только силлиманит (фибролит). Андалузит встречается редко в виде мелких неидиоморфных включений в зернах плагиоклаза и кварца, кианит не установлен. Пегматоидные обособления, содержащие полиморфы  $Al_2SiO_5$ , наблюдаются в виде отдельных разрозненных линз размером до 0.5 м. Как правило, они окружены меланократовой „рубашкой“, состоящей более чем на 90 % из биотита. Кроме биотита здесь присутствуют мусковит, фибролит, гранат, иногда силлиманит, ставролит, андалузит, плагиоклаз и кварц. Ставролит и андалузит встречаются только в виде мелких неограниченных зерен, включенных в зерна плагиоклаза и кварца. Кристаллы граната (диаметром около 1 мм) содержат S-образно расположенные включения ильменита.

### СОСТАВЫ МИНЕРАЛОВ

Проанализированы минералы самих пегматоидных обособлений, меланократовой „рубашки“ вокруг них, а также вмещающих сланцев. Гранаты из всех образцов характеризуются слабовыраженной зональностью, по главным компонентам колебания незначительны (железистость увеличивается от центра к краю от 86 до 88 % в одних случаях и от 83 до 84 % — в других, табл. 1, 2). Основность плагиоклаза составляет 17 % анортитового компонента во вмещающих сланцах, 32—41 % — в пегматоидных обособлениях. Железистость ставролита равна 78—79, биотита — 44—50 %, в мусковите зафиксировано

Таблица 1. Составы минералов метаморфических пород Цэлского блока, использованные при расчетах

Компонент	1				2				3						
	Grт (ц)	Grт (к)	Pl	St	Grт (ц)	Grт (к)	Pl	St	Grт (ц)	Grт (к)	Pl	And (роз)	And (б/ц)	Ky	Sil
SiO <sub>2</sub> , мас. %	37.35	37.33	59.35	26.55	36.21	36.20	62.10	27.30	37.58	37.09	59.27	37.04	36.64	36.99	36.66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.82	20.93	25.39	53.73	20.80	20.70	22.48	53.71	20.99	21.09	25.90	62.51	62.53	62.72	62.99
TiO <sub>2</sub>	—	—	—	0.68	0.01	—	—	0.62	0.00	0.01	—	—	—	—	—
MgO	2.97	2.51	—	1.96	3.44	3.32	—	2.23	3.61	3.39	—	0.24	0.06	0.02	0.01
FeO	31.71	32.96	—	12.85	29.07	29.22	—	13.78	31.98	31.93	—	0.74	0.22	0.11	0.08
MnO	5.17	4.53	—	0.22	8.03	8.32	—	0.54	3.94	3.81	—	—	—	—	—
CaO	2.20	2.45	7.06	—	1.41	1.29	4.08	—	1.93	1.84	7.79	—	—	—	—
Na <sub>2</sub> O	—	—	8.24	0.10	—	—	10.84	0.01	—	—	6.22	—	—	—	—
K <sub>2</sub> O	—	—	0.07	—	—	—	—	—	—	—	0.07	—	—	—	—
ZnO	—	—	—	1.43	—	—	—	0.16	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	100.28	100.77	100.22	97.72	99.01	99.10	99.60	98.25	100.10	99.22	99.26	100.67	99.50	99.88	99.81
<i>Кристаллохимические формулы</i>															
Si	3.00	3.00	2.65	7.43	2.96	2.96	2.78	7.57	3.01	3.00	2.65	1.00	1.00	1.00	0.99
Al	1.97	1.98	1.34	17.73	2.00	1.99	1.18	17.55	1.98	2.01	1.37	1.98	2.00	2.00	2.01
Ti	—	—	—	0.14	0.00	—	—	0.13	0.00	0.00	—	—	—	—	—
Mg	0.36	0.30	—	0.82	0.42	0.40	—	0.92	0.43	0.41	—	0.01	0.00	0.00	0.00
Fe	2.13	2.21	—	3.01	1.99	2.00	—	3.20	2.14	2.16	—	0.02	0.01	0.00	0.00
Mn	0.35	0.31	—	0.05	0.56	0.58	—	0.13	0.27	0.26	—	—	—	—	—
Ca	0.19	0.21	0.34	—	0.12	0.11	0.20	—	0.17	0.16	0.37	—	—	—	—
Na	—	—	0.71	0.05	—	—	0.94	0.01	—	—	0.54	—	—	—	—
Zn	—	—	—	0.30	—	—	—	0.03	—	—	—	—	—	—	—
<i>Минералы</i>															
Alm	0.70	0.73	—	—	0.64	0.65	—	—	0.71	0.72	—	—	—	—	—
Py	0.12	0.10	—	—	0.14	0.13	—	—	0.14	0.14	—	—	—	—	—
Spss	0.12	0.10	—	—	0.18	0.19	—	—	0.09	0.09	—	—	—	—	—
Grss	0.06	0.07	—	—	0.04	0.04	—	—	0.05	0.05	—	—	—	—	—
An	—	—	0.32	—	—	—	0.17	—	—	—	0.41	—	—	—	—
Ab	—	—	0.68	—	—	—	0.83	—	—	—	0.59	—	—	—	—
xFe	0.86	0.88	—	0.79	0.83	0.83	—	0.78	0.83	0.84	—	—	—	—	—

Примечание. Приведены составы минералов из: 1 — меланократовой „рубашки“, 2 — вмещающих сланцев, 3 — пегматоидных обособлений; Grт (ц) — анализ центральной части зерна граната, Grт (к) — краевой части; And (роз) — анализ розового зерна андалузита, And (б/ц) — бесцветного зерна; xFe = Fe/(Fe + Mg); формулы ставролита рассчитаны на 46 O; все железо представлено в виде FeO. Анализы выполнены в ИГМ СО РАН, (г. Новосибирск) аналитик Е.Н. Нигматулина.

Таблица 2.

Составы слюд из метаморфических пород Цэлского блока

Компонент	1		2		3	
	Ms	Bt	Ms	Bt	Ms	Bt
SiO <sub>2</sub> , мас.%	46.24	34.98	45.97	36.72	46.45	35.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36.22	19.36	36.16	20.48	37.45	19.15
TiO <sub>2</sub>	0.63	1.89	0.40	1.30	0.21	1.54
MgO	0.63	10.17	0.66	12.01	0.76	10.40
FeO	1.12	18.37	0.99	16.97	0.93	18.00
MnO	—	—	—	0.14	—	—
Na <sub>2</sub> O	1.15	0.25	1.75	0.49	0.97	0.15
K <sub>2</sub> O	9.27	9.42	8.45	8.56	8.69	8.76
Сумма	95.31	94.61	94.41	96.72	95.49	93.08
<i>Кристаллохимические формулы</i>						
Si	3.06	2.67	3.06	2.70	3.04	2.70
Al(IV)	0.94	1.33	0.94	1.30	0.96	1.30
Al(VI)	1.88	0.41	1.89	0.47	1.94	0.44
Ti	0.03	0.11	0.02	0.07	0.01	0.09
Mg	0.06	1.16	0.07	1.31	0.07	1.20
Fe	0.06	1.17	0.05	1.04	0.05	1.16
Mn	—	—	—	0.01	—	—
Na	0.15	0.04	0.23	0.07	0.12	0.02
K	0.78	0.92	0.72	0.80	0.73	0.86
xFe		0.50		0.44		0.49

около 1 мас.% FeO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В составе полиморфов Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> из примесей присутствует железо в андалузите. Зерна, имеющие розовую окраску, содержат до 0.74 мас.% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, бесцветные зерна — около 0.2 мас.%.

### ВЗАИМООТНОШЕНИЯ МИНЕРАЛОВ

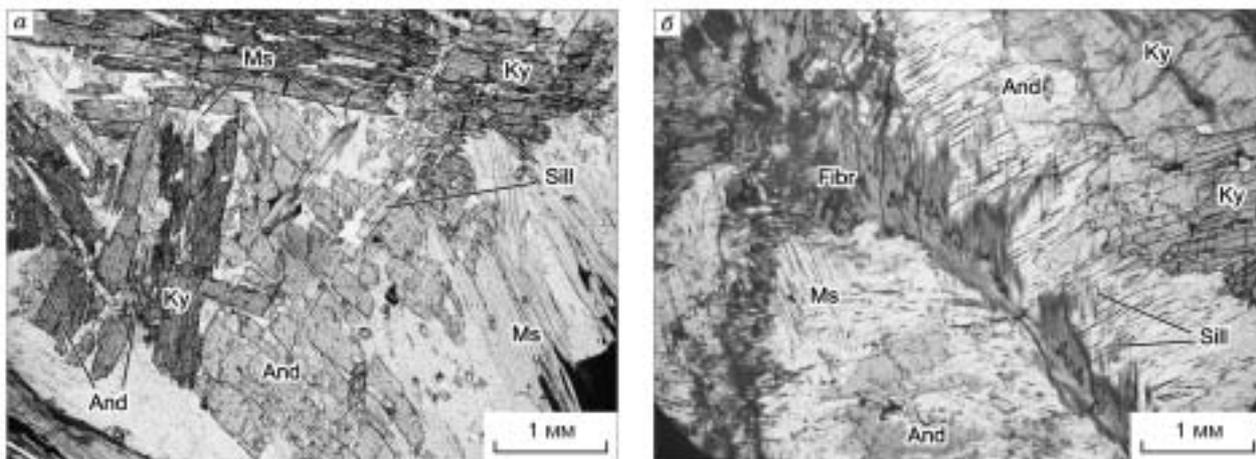
Макроскопически в пегматоидных обособлениях отчетливо видны крупные (до 4—5 см) минеральные агрегаты, представляющие собой псевдоморфозы кианита по андалузиту. Они имеют призматическую с ромбовидными сечениями форму, но выполнены беспорядочно расположенными кристаллами кианита, между которыми встречаются реликты андалузита неправильной формы. Помимо андалузита и кианита в образцах хорошо видны крупные (порядка 1 см) пластинки мусковита, расположенные между псевдоморфозами, и отдельные зерна кварца.

Полная минеральная ассоциация пегматоидных обособлений: And + Ky + Sil + Fibr + Ms + Qtz + Pl + St + Grt + Bt, подавляющий объем занимают полиморфы Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> (30—50 об.%), мусковит (30—60 об.%) и кварц (до 20 об.%). Биотит и плагиоклаз присутствуют в небольших количествах, зерна ставролита и граната встречены в единичных случаях.

Андалузит представлен сильно резорбированными по краям зернами, которые встречаются в виде реликтов между кристаллами кианита в псевдоморфозах (рис. 2, а) или в виде бесформенных зерен, окруженных крупными чешуями мусковита. В псевдоморфозах он, как правило, отделен от окружающего кианита мусковитовой каймой. В некоторых случаях установлено его обрастание по краям зерен спутанно-волоконистым агрегатом фибролита.

Кианит также наблюдается в двух ситуациях. С одной стороны, разноориентированные кристаллы кианита образуют псевдоморфозы по андалузиту, а с другой — он, подобно андалузиту, встречается в виде резорбированных зерен внутри крупных чешуй мусковита. В некоторых случаях отмечается присутствие нескольких разрозненных частей одного зерна кианита в одной крупной чешуе мусковита, в которой могут присутствовать также игольчатые кристаллы силлиманита или фибролит.

Силлиманит образует длиннопризматические кристаллы, расположенные преимущественно в мусковите, но они встречаются и в зернах андалузита, а также в кианит-силлиманитовых псевдоморфозах (см. рис. 2, а), где кристаллы силлиманита располагаются, как правило, параллельно друг другу. В некоторых случаях в одном зерне андалузита могут находиться две разноориентированные системы параллельно расположенных кристаллов силлиманита.



**Рис. 2.** Микрофотографии взаимоотношений полиморфных модификаций  $Al_2SiO_5$  в шлифах.

*a, б* — пояснения в тексте.

Для фибролита характерным является нахождение спутанно-волоконистых его агрегатов по границам зерен андалузита как неизменных, так и замещенных с краев крупночешуйчатым мусковитом. В таком случае формируются фибролит-мусковитовые псевдоморфозы, где по краю бывшего зерна андалузита расположен фибролит, а внутренняя часть заполнена крупными чешуями мусковита с реликтами андалузита (см. рис. 2, б). При этом волоконистый фибролит при переходе к внутренней части псевдоморфозы сменяется призматическим силлиманитом, кристаллы которого ориентируются одинаково в крупночешуйчатом мусковите (см. рис. 2, б). Аналогичные структуры образуются и вокруг андалузит-кианитовых агрегатов.

#### УСЛОВИЯ МЕТАМОРФИЗМА

Моновариантная минеральная ассоциация (в системе  $K_2O-SiO_2-Al_2O_3-FeO-MgO$ )  $Bt + Ms + St + Grt + Ky + Pl + Qtz$ , установленная в образцах, устойчива до температур  $590\text{ }^\circ\text{C}$  [Федькин, 1970], максимальные значения температур достигаются вблизи линии кианит—силлиманит. О близких температурах свидетельствует железистость ставролита ( $x_{Fe} = 0.78$ , см. табл. 1), характерная для высокотемпературной границы устойчивости ассоциации  $St + Al_2SiO_5 + Bt + Ms$  [Федькин, 1970], а также появление наряду с ним граната с высокой железистостью ( $x_{Fe} = 0.83-0.88$ ). О приближении к этой границе свидетельствует начало растворения ставролита, что выражается в наличии в породе мелких резорбированных его зерен с повышенным содержанием цинка (до 1.43 мас.%). Вместе с тем присутствие в ассоциации силлиманита наряду с кианитом свидетельствует о том, что условия метаморфизма близки к линии их равновесия. По данным гранат-биотитового термометра, гранат-плагноклаз-силлиманит-кварцевого и гранат-мусковит-плагноклаз-биотитового барометров, параметры минералообразования вмещающих пород и меланократовой „рубашки“ составляют  $550-560\text{ }^\circ\text{C}$  при 5—5.8 кбар (табл. 3). Давления, полученные с использованием составов минералов из пегматоидных обособлений, чуть ниже давлений, полученных для вмещающих пород, и составляют 4—5 кбар при температуре  $585-590\text{ }^\circ\text{C}$ . Близкие значения  $PT$ -параметров получены с использованием программы THERMOCALC [Holland, Powell, 1990]. При этом ставролит и андалузит в расчет не принимались, поскольку во всех образцах обнаружены следы их растворения.

Таблица 3.  $PT$ -условия метаморфизма пород Цэлского блока

Тип породы	$T, ^\circ\text{C}$		$P, \text{кбар}$			$T, P$
	KR	FS	NH	KN	ASH	T
Вмещающие породы	560	550	5.5	6.6	5.7	$562 \pm 23\text{ }^\circ\text{C}$ $5.8 \pm 1.1 \text{ кбар}$
Меланократовая „рубашка“ вокруг жил	545	500	5	5.8	4.9	$557 \pm 23\text{ }^\circ\text{C}$ $5.5 \pm 1 \text{ кбар}$
Пегматоидные обособления	585	590	4	4.5	4.9	$548 \pm 22\text{ }^\circ\text{C}$ $4.8 \pm 1 \text{ кбар}$

Примечание. Использовались калибровки Grt-Bt геотермометра: KR — [Kleemann, Reinhardt, 1994], FS — [Ferry, Spear, 1978]; Grt-Pl-Sil-Qtz геобарометра: NH — [Newton, Haselton, 1981], KN — [Koziol, Newton, 1988]; Grt-Ms-Pl-Bt геобарометра: ASH — [Ashworth, Evirgen, 1985] и T-программа THERMOCALC [Holland, Powell, 1990].

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Исходя из наблюдаемых взаимоотношений минералов, установлена следующая последовательность образования полиморфных модификаций  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ : в начале андалузит замещается кианитом с образованием псевдоморфоз, затем происходит формирование фибrolита, который сменяется призматическим силлиманитом. То, что рост фибrolита происходит после кианита, доказывается его присутствием в мусковите, развивающемся по кианиту. Образование силлиманита, по-видимому, происходит позднее или синхронно с появлением крупного мусковита, замещающего зерна андалузита и псевдоморфозы кианита по андалузиту.

2. Несмотря на близость рассчитанных *PT*-параметров к значениям тройной точки [Pattison, 1992], в породах резко проявлены признаки замещения андалузита кианитом и силлиманитом. Учитывая минеральные ассоциации вмещающих метаморфических пород, отвечающие кианит-силлиманитовому типу метаморфизма, и присутствие андалузита в них только в виде реликтов, можно предположить, что формирование андалузита связано с более ранними метаморфическими событиями.

Такая последовательность образования полиморфных модификаций согласуется с данными И.К. Козакова о смене характера метаморфизма в регионе с андалузит-силлиманитового типа на кианит-силлиманитовый.

3. Большое количество мусковита в жилах, содержащих полиморфные модификации  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ , и его присутствие на контактах между разными фазами может свидетельствовать о значительной роли мусковита в фазовых переходах между разными полиморфами. Поскольку другие фазы, помимо  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  и мусковита, присутствуют в крайне незначительных количествах, то возможным способом преобразования полиморфов может быть механизм ионного обмена [Carmichael, 1969].

Автор признателен Г.Г. Лепезину за ценные замечания, Р.А. Шелепаеву, В.В. Егоровой, В.М. Калугину за помощь в проведении полевых работ.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ РФ НШ-4922.2006.5.

## ЛИТЕРАТУРА

**Байкова В.С., Козаков И.К., Крылов И.Н.** Гашуннурский дайковый комплекс Монгольского Алтая // Изв. РАН, Сер. геол., 1992, № 4, с. 42—51.

**Бибилова Е.В., Кирнозова Т.И., Козаков И.К., Котов А.Б., Неймарк Л.А., Гороховский Б.М., Шулешко И.К.** Полиметаморфические комплексы южного склона Монгольского Алтая: результаты уран-свинцового датирования // Геотектоника, 1992, № 2, с. 104—112.

**Козаков И.К.** Докембрийские инфраструктурные комплексы Монголии. Л., Наука, 1986, 144 с.

**Козаков И.К., Глебовицкий В.А., Бибилова Е.В., Азимов П.Я., Кирнозова Т.И.** Геодинамическая позиция и условия формирования гранулитов герцинид Монгольского и Гобийского Алтая // Докл. РАН, 2002, т. 386, № 1, с. 82—87.

**Федькин В.В.** Анализ парагенезисов ставролита // Очерки физико-химической петрологии, Вып. II. М., Наука, 1970, с. 214—255.

**Ashworth J.R., Evirgen M.M.** Plagioclase relations in pelites, Central Meuderes Massif, Turkey. II. Perturbation of garnet-plagioclase geobarometers // J. Metamorph. Geol., 1985, v. 3, № 3, p. 219—229.

**Carmichael D.M.** On the mechanism of prograde metamorphic reaction in quartz-bearing pelitic rocks // Contr. Miner. Petrol., 1969, v. 20, p. 244—267.

**Ferry J.M., Spear F.S.** Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet // Contr. Miner. Petrol., 1978, v. 66, p. 113—117.

**Holland T.J.B., Powell R.** An enlarged and updated internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: the system  $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{MnO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2-\text{C}-\text{H}_2-\text{O}_2$  // J. Metamorph. Geol., 1990, v. 8, № 1, p. 89—124.

**Kerrick D.M.** The  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  polymorphs // Rev. Miner., 1990, v. 22, p. 406.

**Kleemann U., Reinhardt J.** Garnet-biotite thermometry revisited: the effect of Al(VI) and Ti in biotite // Eur. J. Miner., 1994, v. 6, p. 925—941.

**Koziol A.M., Newton R.C.** Redetermination of the anorthite breakdown reaction and improvement of the plagioclase-garnet- $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ -quartz geobarometer // Amer. Miner., 1988, v. 73, p. 216—223.

**Newton R.C., Haselton H.T.** Thermodynamics of the garnet-plagioclase- $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ -quartz geobarometer // Thermodynamics of minerals and melts / Eds. R.C. Newton, A. Navrotsky, B.J. Wood. N.Y., Springer, 1981, p. 131—147.

**Pattison D.R.M.** Stability of andalusite and sillimanite and the  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  triple point: constraints from the Ballachulish aureole, Scotland // J. Geol., 1992, v. 100, p. 423—446.

Рекомендована к печати 7 ноября 2006 г.  
В.С. Шацким

Поступила в редакцию  
6 июня 2006 г.