

ВЫСОКОБАРИЧЕСКИЙ МЕТАМОРФИЗМ АМФИБОЛИТОВОЙ ФАЦИИ ДЖУГДЖУРО-СТАНОВОГО БЛОКА (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ)**И.А. Александров***Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток*

На основании новых микронзондовых анализов минералов проведена геотермобарометрия пород амфиболитовой фации Джугджуро-Станового блока Восточной Сибири. Установлено, что метаморфизм пород зейского и станового комплексов происходил в интервале температур 600–700°C. Оценки литостатического давления для пород станового комплекса варьируют в пределах 6.5–9 кбар, а зейского – от 9 до 13–14 кбар. Метаморфизм Джугджуро-Станового блока связывается с переработкой Алдано-Станового щита в позднем палеопротерозое (~1.9 млрд лет назад). С позиции геодинамики причиной этих преобразований могла послужить субдукция (или частичный поддвиг в процессе коллизии) Становой плиты под южную часть Алданского щита.

Ключевые слова: метаморфизм, геотермобарометрия, геодинамика, THERMOCALC, Алдано-Становой щит.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно считалось, что гранулиты Алданского щита являются как более древними, так и более глубинными образованиями по сравнению с породами амфиболитовой фации Станового мегаблока. Однако И.В. Козыревой и соавторами [12] для пород амфиболитовой фации восточной части Джугджуро-Станового блока были сделаны примерные оценки давления, которые превысили значения, полученные для наиболее глубинных гранулитов юга Алданского щита. Позднее на основании данных [12], обработанных при помощи программы THERMOCALC [33], были рассчитаны P и T образования этих пород, подтверждающие предположения о большой глубинности их метаморфизма [4]. Эти расчеты позволили предложить новую геодинамическую модель формирования и высокобарного метаморфизма Джугджуро-Станового блока в результате субдукции Становой плиты под южную часть Алданского щита [4]. Тем не менее, высокие давления метаморфизма пород амфиболитовой фации Джугджуро-Станового блока требуют подтверждения на основе нового материала. Таким образом, целью данной работы является расчет новых достоверных P-T параметров главного этапа метаморфизма блока и выяснение тектонических со-

бытий, приведших к глобальной перестройке Алдано-Станового щита в позднем палеопротерозое.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОСТРУКТУР АЛДАНО-СТАНОВОГО ЩИТА

Алдано-Становой щит охватывает бассейны верхнего течения правых притоков Лены – Витима, Олекмы и Алдана, Становой хребет, бассейны верхнего течения левых притоков Амура – Ольдоя и Зеи, а также частично левобережье Уды [7]. В его составе традиционно выделяют две крупные структуры: Алданский мегаблок (или Алданский щит) на севере и Становой мегаблок (иногда называемый Становым поясом) на юге (рис. 1). Центральную, наиболее крупную часть Алданского мегаблока, представляет собственно Алданский блок, ограниченный с запада Олекминским и с востока Батомгским блоками. Алданский блок (Алданская гранулитогнейсовая область) представляет собой древнейшее консолидированное ядро Алдано-Станового щита – Алданский кристаллический протомассив. Остальные структуры щита составляют более позднее его обрамление. Южная часть Алдано-Станового щита – Становой мегаблок – разделяется на два блока: западный – Селенго-Становой и восточный – Джугджуро-Становой, причем последний огра-

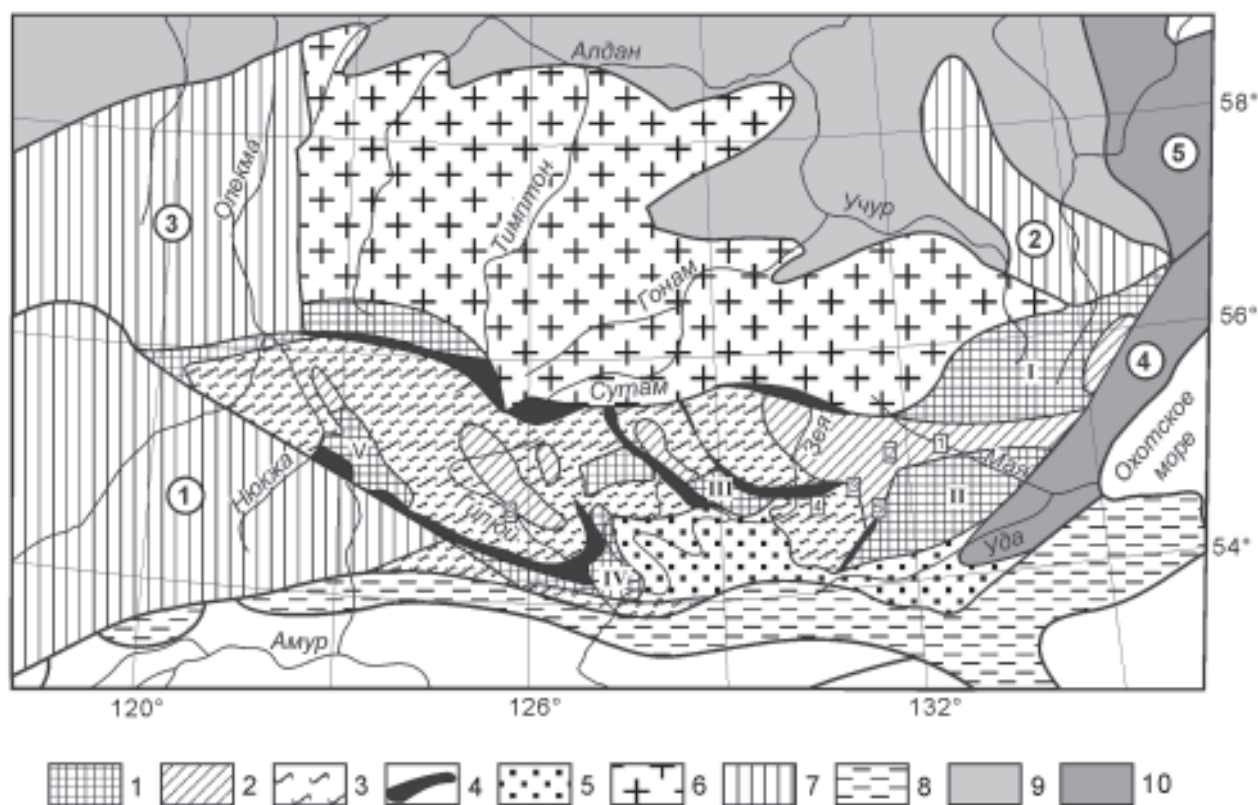


Рис. 1. Структурно-фациальная схема фундамента Джугджуро-Станового блока и граничных структур (компиляция по [7, 11, 12]).

1–5 – образования Джугджуро-Станового блока: 1 – гранулиты зверевско-чогарского комплекса (блоки: I – Джугджурский, II – Чогарский, III – Сивакано-Токский, IV – Дамбукинский, V – Ларбинский); 2–3 – породы амфиболитовой фации (2 – зейский комплекс, 3 – становой комплекс); 4 – гилюйский и желтулакский комплексы; 5 – мезозойско-кайнозойские отложения. 6 – Алданский блок (гранулитогнейсовая область). 7 – другие блоки Алдано-Станового щита (цифры в кружках: 1 – Селенго-Становой, 2 – Батомгский, 3 – Олекминский). 8 – Монголо-Охотская складчатая система; 9 – Алданская плита; 10 – перикратонные прогибы (цифры в кружках: 4 – Аяно-Шевлинский, 5 – Юдомо-Майский).

Цифры в прямоугольниках – места отбора образцов (см. табл. 1).

ничивается с юга Алданский блок на всей его протяженности.

ПОРОДЫ ФУНДАМЕНТА ДЖУГДЖУРО-СТАНОВОГО БЛОКА

Важной особенностью Джугджуро-Станового блока является наличие в его структуре гранулитовых блоков разного размера среди преобладающих метаморфических пород амфиболитовой фации (рис. 1). Границы между этими гранулитовыми блоками и вмещающими породами всегда имеют тектоническую природу. От окружающих пород они отделены широкими зонами диафторитов и бластомилонитов и не имеют переходных зон метаморфизма до условий амфиболитовой фации. Гранулиты объе-

динены в зверевско-чогарский комплекс и отличаются обилием в разрезе кристаллических сланцев основного состава с низким содержанием калия, а также наличием высокомагнезиальных кристаллосланцев [10].

Метаморфические породы амфиболитовой фации составляют значительную часть Джугджуро-Станового блока и первоначально были объединены в единый становой комплекс [19]. Позднее Л.П. Карсаковым [11] из состава станового комплекса были выделены зейский и гилюйский комплексы.

Породы зейского комплекса представлены биотитовыми, биотит-роговообманковыми, гранат-биотитовыми, гранат-биотит-роговообманковыми, двуслюдяными, гранат-эпидот-биотитовыми плагиогнейсами,

гнейсами и сланцами, амфиболитами (в том числе гранатовыми). Реже встречаются цоизит-клинопироксеновые кристаллические сланцы, биотит-клинопироксен-амфиболовые и цоизит-биотитовые гнейсы, прослои и линзы кварцитов, мраморов и кальцифиров. Отличительной чертой данного комплекса является частое присутствие в породах эпидота и цоизита.

Отложения станового комплекса характеризуются достаточно однообразным составом. В комплексе преобладают биотитовые, роговообманковые, биотит-роговообманковые, роговообманково-биотитовые кристаллические сланцы и гнейсы, гранат-биотитовые и двуслюдяные гнейсы, амфиболиты. Породы часто гранатсодержащие, иногда с кианитом и силлиманитом.

Стратиграфия и состав “трогового” [11] гиллойского комплекса изучены слабо. Слагающие его породы метаморфизованы в условиях от эпидот-амфиболитовой до амфиболитовой фаций.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ ОЦЕНКИ ВОЗРАСТА И УСЛОВИЙ МЕТАМОРФИЗМА

Согласно принятым представлениям, гранулиты зверевско-чогарского комплекса считаются древнейшими отложениями на территории Джугджуро-Станового блока и, в соответствии с [17], относятся к нижнему алданию. Породы зейского и станового комплексов также картируются как нижнеархейские – верхний алданий и становий, соответственно.

К сожалению, детальные геохронологические и изотопно-геохимические исследования в пределах Джугджуро-Станового блока проводились только на относительно небольшом участке – в низовьях р. Гиллой в области залегания пород иликанской и дамбукинской серий станового и зверевско-чогарского комплексов, соответственно (район Дамбукинского гранулитового блока). И хотя эти, полученные за последние полтора десятилетия, данные значительно “омолаживают” породы фундамента Джугджуро-Станового блока, вопрос о возрасте супракрустальных образований, распространенных на остальной его территории, остается. Особенно это актуально для плохо изученной восточной части блока.

Большая работа по геохронологии пород Алдано-Станового щита при помощи метода SHRIMP выполнена Натманом с коллегами [30]. В тоналитовых гнейсах и секущих их метабазитах в бассейне р. Гиллой ими обнаружены две группы цирконов. Для цирконов из тоналитовых гнейсов получен возраст 2.75–2.79 млрд лет. По данным Натмана [30], секущие тоналиты дайки метабазитов не пересекают окружающие стратифицированные породы зверевско-чогар-

ского и станового комплексов. Следовательно, возраст протолита этих метаморфических комплексов не может превышать 2.8 млрд лет. Вторая, более молодая группа цирконов имеет возраст 1.92–1.96 млрд лет и была обнаружена только в ассоциации зеленая роговая обманка+плагиоклаз+кварц. Таким образом, цифры 1.92–1.96 млн лет, скорее всего, датируют время метаморфизма амфиболитовой фации пород Джугджуро-Станового блока. Сходные U-Pb оценки получены для цирконов из метагранитоидов Дамбукинского блока [8]. Возраст этих пород оказался равным ~2.83 млрд лет, а датировки последующих двух этапов высокотемпературного метаморфизма оцениваются в 2.65 и 1.88 млрд лет. Последняя цифра совпадает с оценкой (Sm-Nd метод по гранату) возраста заключительного этапа метаморфизма, проявленного в двупироксеновых кристаллических сланцах Мульмугинского блока (север центральной части Джугджуро-Станового блока) [8]. Протерозойским возрастом, близким к 1.9 млрд лет, датируются также некоторые породы граничных Селенго-Станового [30] и Алданского [21, 25, 30] блоков. Эта оценка, по мнению [30], отражает возраст глобальных преобразований Алдано-Станового щита.

Гранулитовые породы юга Алданского щита, выделенные А.А. Маракушевым [13] в составе сутамской фации, считались наиболее глубинными метапородами в пределах всего Алданского щита. Последующие количественные оценки P-T параметров показали, что условия метаморфизма сутамских гранулитов не выдержаны по литостатическому давлению, максимальная величина которого не превышает 9.5 кбар [2, 4, 31]. Гранулиты, распространенные в пределах изучаемого Джугджуро-Станового блока, также метаморфизованы неравномерно. Максимальные P-T оценки получены для пород Сивакано-Токского и Чогарского блоков (рис. 1), где температура метаморфизма достигала 1000°C, а давление – 10–11 кбар [11]. Наиболее слабометаморфизованными являются гранулиты Дамбукинского блока, где давление оценивается величиной 7 кбар при температуре, достигавшей по разным оценкам 750–800°C [5] и 650°C [20].

Метаморфизм амфиболитовой фации Джугджуро-Станового блока, вероятно, также был сильно дифференцирован по давлению, но при достаточно равномерном температурном режиме – в пределах 580–700°C [1, 4, 11, 12, 14, 20, 22]. Верхняя температурная граница (700°C) подтверждается полным отсутствием в минеральных ассоциациях ортопироксена. Давление при метаморфизме большинством исследователей [11, 14, 20] оценивалось в 7–7.5 кбар,

причем эти оценки носили полуколичественный характер. Вероятно, полученные величины давления являются справедливыми для наиболее хорошо изученных центральной и западной частей Джугджуро-Станового блока. Для восточной части описываемой структуры (Удско-Майский блок, между Джугджурским и Чогарским гранулитовыми блоками) И.В. Козыревой и соавторами [12] предполагается более высокое давление (до 10 кбар) метаморфизма пород зейского комплекса, обусловившее специфику минеральных парагенезисов метаморфических пород. В более поздней работе [4] с использованием программы THERMOCALC [33] были пересчитаны данные И.В. Козыревой и др. [12] и получены значения давления для пород зейского комплекса в диапазоне 9–11.5 кбар и станового – 7–8.1 кбар.

МИНЕРАЛЬНЫЕ ПАРАГЕНЕЗИСЫ

Для оценки физико-химических условий образования метаморфических пород станового и зейского комплексов нами были выполнены новые микронзондовые исследования в 25 образцах*. Краткая характеристика образцов, использованных для целей термобарометрии, приведена в таблице 1. Для исследований отбирались образцы с наиболее многоминеральными парагенезисами, не затронутые вторичными изменениями.

Для породообразующих минералов изученных пород характерны широкие вариации состава. Гранаты представлены существенно альмандиновыми разновидностями (от 44.1 до 69.3% альмандина) с подчиненными содержаниями гроссулярового (12.1–37.7%), пиропового (2.9–24.1%) и спессартинового (0.6–22.4%) миналов (табл. 2). Подавляющее большинство гранатов обнаруживает различные виды зональности, преобладающим из которых является уменьшение доли MnO от центра кристаллов к краям (табл. 2). Амфиболы изученных парагенезисов относятся к группе кальциевых амфиболов: к ряду гастингсит-ферропаргасит-магнезиогастингсит ($K+Na_A > 0.5$) для пород зейской серии, и – феррочермакит-чермакит ($K+Na_A < 0.5$) для становой серии, с общим преобладанием железистых разновидностей (табл.2). Биотиты отличаются относительно высоким содержанием титана (2.5–3.94 мас.% TiO_2), а их железистость колеблется в пределах 35.4–64% (табл. 2). Эпидоты варьируют по железистости ($Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Al)$) от 0.15 до 0.28. В

*Анализы выполнены в Институте вулканологии ДВО РАН на рентгеноспектральном микроанализаторе Camebax, кроме образца ОГ-6, проанализированного на микронзонде JXA-5A в ДВГИ ДВО РАН. Результаты анализов использованных в работе образцов могут быть высланы по первому требованию.

Таблица 1. Характеристика исследованных пород.

№№	Порода	Комплекс	Место отбора	Минеральный парагенезис													
				Grt	Hb	Ep	Bt	Pl	Q	Ap	Sph	Zr	Kfs	Chl	рудный		
40	Grt-Bt гнейс	зейский	р.Эдугу-Чайдах (1)*	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Mgt
91в	Grt-Bt гнейс	зейский	р.Мая, р.Салга (2)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
505	Bt гнейс	зейский	верховье р.Луча (3)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Mgt
513а	Bt-Hb кр. сланец	зейский	р.Луча, р.Ноякан (3)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
518	Bt-Hb кр. сланец	зейский	исток р.Ноякан (3)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Mgt
519в	Grt-Hb гнейс	зейский	исток р.Ноякан (3)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
584	Bt-Hb гнейс	зейский	р.Луча (3)	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Ru
620	Hb-Bt гнейс	становой	р.Луча, р.Долгусмар (4)	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
621а	Grt амфиболит	становой	р.Луча, р.Долгусмар (4)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Mgt, Ilm
628	Grt-Bt гнейс	становой	р.Луча, р.Долгусмар (4)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Mgt
784	Grt-Bt гнейс	зейский	р.Уддыхын (5)	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Ti-Mgt, Ilm
792б	Grt амфиболит	зейский	р.Уддыхын (5)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Ilm
ОГ-6	Grt амфиболит	становой	р.Гиллой (6)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Примечание. «+» – наличие минерала, «+++» – минерал проанализирован. Обозначения минералов: Grt – гранат, Hb – амфибол, Ep – эпидот, Bt – биотит, Pl – плагиоклаз, Q – кварц, Ap – апатит, Sph – сфен, Zr – циркон, Kfs – КФШ, Chl – хлорит, Mgt – магнетит, Ti-Mgt – титаномагнетит, Ru – рутил, Ilm – ильменит. *Цифры в скобках – места отбора образцов (рис. 1).

Таблица 2. Результаты гранат-биотитовой и гранат-амфиболовой термометрии пород при P=9 кбар.

№	X_{Mg}^{Grt}	X_{Fe}^{Grt}	X_{Mn}^{Grt}	X_{Ca}^{Grt}	X_{Mg}^{Bt}	X_{Fe}^{Bt}	lnK_D^{Grt-Bt}	X_{Mg}^{Hb}	X_{Fe}^{Hb}	lnK_D^{Grt-Hb}	T1*	T2	T3	T4	T5	T6
40	центр	0,051	0,481	0,133	0,336	0,442	0,456	0,349	0,639	1,646	510	535	514	564	689	697
	край	0,068	0,465	0,113	0,354			0,367	0,615	1,402	565	585	586	618	771	773
91в	центр	0,103	0,550	0,078	0,270	0,416	0,437	0,431	0,569	1,401	613	624	639	619	694	702
	край	0,090	0,501	0,042	0,367			0,411	0,587	1,357	607	609	654	629	796	796
505	центр	0,029	0,450	0,143	0,377	0,230	0,640	0,221	0,762	1,492	598	626	568	598	767	769
	край	0,040	0,488	0,130	0,342			0,225	0,757	1,280	646	669	626	649	796	797
513а	центр	0,089	0,561	0,070	0,280	0,368	0,481	0,403	0,589	1,468	623	631	645	603	686	694
	край	0,083	0,568	0,068	0,281			0,424	0,569	1,629	607	616	628	567	646	656
518	центр	0,083	0,488	0,099	0,331	0,389	0,470	0,365	0,631	1,228	621	637	645	662	802	802
	край	0,093	0,515	0,069	0,323			0,361	0,627	1,164	633	642	666	679	815	814
519в	центр	0,130	0,451	0,064	0,355	-	-	0,568	0,427	1,534	-	-	-	588	735	739
	край	0,119	0,466	0,052	0,363			0,581	0,412	1,711	-	-	-	550	697	703
584	центр	0,187	0,633	0,010	0,170	0,452	0,354	-	-	-	646	640	679	-	-	-
	край	0,160	0,664	0,015	0,161			-	-	-	606	600	634	-	-	-
620	центр	0,060	0,441	0,224	0,274	0,323	0,533	-	-	-	641	689	613	-	-	-
	край	0,056	0,458	0,191	0,294			-	-	-	619	659	598	-	-	-
621а	центр	0,172	0,623	0,038	0,167	-	-	0,447	0,548	1,086	-	-	-	701	682	693
	край	0,169	0,607	0,033	0,191			0,438	0,556	1,041	-	-	-	714	719	728
628	центр	0,077	0,543	0,069	0,311	0,298	0,545	0,369	0,622	1,427	672	681	694	613	724	730
	край	0,086	0,554	0,054	0,305			0,358	0,633	1,287	693	698	723	647	759	763
784	центр	0,085	0,684	0,038	0,193	0,322	0,532	-	-	-	622	623	633	-	-	-
	край	0,091	0,693	0,026	0,190			-	-	-	634	632	650	-	-	-
792б	центр	0,070	0,662	0,007	0,261	-	-	0,278	0,720	1,299	-	-	-	644	714	721
	край	0,075	0,659	0,006	0,259			0,325	0,673	1,446	-	-	-	608	672	682
ОГ-6	центр	0,233	0,596	0,050	0,121	-	-	0,587	0,407	1,305	-	-	-	642	578	597
	край	0,241	0,586	0,050	0,123			0,597	0,397	1,296	-	-	-	645	582	601

Примечание. $X_i^{Grt} = i / (Fe + Mn + Mg + Ca)$, $X_i^{Bt} = i / (Fe + Mg + Mn)$, $K_D = (X_{Fe}^{Hb} / X_{Mg}^{Hb}) / (X_{Fe}^{Grt} / X_{Mg}^{Grt})$. * Температура (°C) согласно термометрам: T1, T2, T4 – формулы 3, 4 и 7 в [16]; T3 – [23]; T5 – [26]; T6 – [32].

центральных частях некоторых кристаллов эпидота отмечаются повышенные содержания Се-РЗЭ (до 10%). Плаггиоклаз преимущественно кислый; содержание анортитового минала изменяется от 14.8 до 48.5%. Более подробная характеристика минералогии и петрохимии пород Джугджуро-Станового блока приведена в работе [12].

ГЕОТЕРМОБАРОМЕТРИЯ Термометрия

Для определения температуры образования исследуемых пород использовалась гранат-биотитовая и гранат-амфиболовая геотермометрия (табл. 2). Предварительно была проведена оценка более десятка существующих калибровок гранат-биотитового термометра. В итоге наиболее адекватные результаты были получены при использовании трех из них (колонки Т1-Т3 в табл. 2). Расчет температуры проводился при давлении 9 кбар. При колебании давления ± 3 кбар показания термометров Т1 и Т2 изменяются менее чем на 20°C, а термометра Т3 – не более чем на 5°C.

Существуют три варианта калибровки гранат-амфиболового геотермометра. Температуры, полученные для наших пород в результате расчета по этим уравнениям, приведены в таблице 2 (Т4-Т6). Уравнения Т5 и Т6 незначительно отличаются друг от друга. Рассчитанные с их помощью температуры близки между собой и несколько завышены.

Как видно из таблицы 2, ни один из рассмотренных гранат-биотитовых и гранат-амфиболовых геотермометров не может быть использован в качестве наиболее подходящего, т.к. каждый дает некорректные оценки температуры для каких-либо образцов. Тем не менее, пиковые (максимальные для каждого образца) температуры, полученные с помощью уравнений Т1-Т4, примерно укладываются в интервал 600–700°C и, следовательно, отражают общую картину температурного режима образования пород Джугджуро-Станового блока.

Согласно рассчитанным данным, температура образования ядер кристаллов минералов ряда образцов выше температуры образования оболочек, что свидетельствует о регрессивном этапе метаморфизма, охватившем часть изученных образований.

Барометрия

Для определения давления образования метабазитов Джугджуро-Станового блока использовались два варианта амфибол-гранат-плаггиоклазового барометра. Первый вариант геобарометра [29] основан на термодинамическом расчете двух минеральных реакций, учитывающих обмен Mg (1) и Fe (2) между ам-

фиболом и гранатом в присутствии плаггиоклаза и кварца. Результаты расчетов по этому барометру для разных температур представлены в таблице 3. Ошибка данного барометра с учетом аналитической неточности и неопределенности температуры не должна превышать 0.5 кбар, если составы минералов попадают в принятые границы [29]. Нами были рассчитаны давления для всех образцов, содержащих амфибол, гранат и плаггиоклаз, но состав минералов в некоторых образцах не отвечает ограничивающим критериям (табл. 3). Основным отличием от предложенных в [29] критериев является высокая калиевоность роговой обманки ($K > 0.4$ ф.ед., табл. 3), а также повышенное содержание альбита в плаггиоклазе ($Ca < 0.15$ ф.ед., обр. 40, край) и повышенная марганцовистость граната ($Mn > 0.45$ ф.ед., обр. 505, край). Тем не менее, по нашему мнению, барометр [29] показывает близкие к реальным величины давлений и для равновесий отличающихся от заданных составов минералов. Об этом свидетельствует их совпадение со значениями давления для валидных образцов и небольшой разброс оценок давления между собой. Для температуры в 650°C этот барометр показывает интервал давлений для зейского комплекса от 12 до 14 кбар (кроме обр. 513а), а для станового – 6–10 кбар (табл. 3).

Второй вариант амфибол-гранат-плаггиоклазового геотермобарометра Дэйла и соавторов [24] основан на четырех равновесиях, причем первые три уравнения служат барометрами, а последнее (без участия плаггиоклаза) представляет собой термометр [24]. Отличительной чертой данного геотермобарометра является то, что в его рамках предложена новая, наиболее многокомпонентная на сегодня модель твердого раствора амфибола. Еще одна важная особенность – расчет среднего P с учетом неопределенности по давлению (1 кбар), температуре (50°C) и составу амфибола (1.5 мас. %). Методика этих расчетов описана в Приложении 2 [24]. Результаты применения данного геотермобарометра показаны в таблице 4. Расчет производился методом итерации. Исходные P_0 и T_0 замещались полученными $P_{\text{средн.}}$ и T_4 , соответственно, до достижения равенства между начальными значениями и результатами. С целью исключения влияния неверных оценок температуры в таблице 4 представлены также средние P , рассчитанные для $T=650^\circ\text{C}$.

Как и в случае с предыдущим геобарометром, для данного геотермобарометра имеются ограничения по составу минералов, слагающих парагенезис. Показания для валидных образцов вполне приемлемы и с учетом рассчитанной погрешности дают неплохую сходимость с барометром [29]. Однако наиболее вы-

Таблица 3. Результаты расчета давления (кбар) метаморфизма исследуемых пород при помощи барометра [29] для температур (в скобках) амфиболитовой фации.

№	K ^{Hb**}	lnK _{eq}		P (550°C)		P (600°C)		P (650°C)		P (700°C)		
		Mg***	Fe	Mg	Fe	Mg	Fe	Mg	Fe	Mg	Fe	
40	центр	0,461	7,001	11,5	10,9	11,9	11,5	12,2	12,2	12,2	12,6	12,8
	край	0,385	8,612	13,7	11,7	14,2	12,3	14,6	14,6	13,0	15,1	13,7
91В	центр	0,421	8,738	13,4	11,7	13,8	12,4	14,2	14,2	13,0	14,7	13,7
	край	0,414	9,597	14,4	12,2	14,9	12,9	15,4	15,4	13,5	15,9	14,2
505	центр	0,406	6,883	12,6	10,7	13,0	11,3	13,4	13,4	12,0	13,8	12,6
	край	0,412	6,749	12,7	10,6	13,1	11,2	13,5	13,5	11,8	13,9	12,4
513а*	центр	0,319	3,248	9,9	8,6	10,1	9,1	10,3	10,3	9,5	10,6	10,0
	край	0,276	3,241	9,7	8,7	9,9	9,1	10,1	10,1	9,6	10,3	10,1
518	центр	0,434	7,169	12,9	10,7	13,3	11,3	13,7	13,7	11,9	14,1	12,5
	край	0,428	8,326	13,6	11,3	14,1	12,0	14,5	14,5	12,6	15,0	13,2
519В*	центр	0,262	7,678	13,0	11,2	13,4	11,8	13,7	13,7	12,4	14,1	13,0
	край	0,209	7,856	12,9	11,4	13,3	12,0	13,6	13,6	12,6	14,0	13,2
621а*	центр	0,180	1,093	8,6	7,2	8,7	7,6	8,8	8,8	7,9	9,0	8,3
	край	0,165	0,811	8,6	7,1	8,7	7,4	8,8	8,8	7,7	9,0	8,1
628*	центр	0,252	2,769	9,8	8,3	10,0	8,8	10,2	10,2	9,2	10,4	9,7
	край	0,264	2,530	9,8	8,1	10,0	8,5	10,2	10,2	8,9	10,4	9,4
7926*	центр	0,218	7,436	12,5	10,9	12,9	11,5	13,3	13,3	12,1	13,7	12,7
	край	0,242	6,644	11,8	10,5	12,2	11,1	12,6	12,6	11,7	12,9	12,2
ОГ-6*	центр	0,071	-1,756	6,4	5,8	6,3	6,0	6,3	6,3	6,2	6,3	6,5
	край	0,052	-1,276	6,7	6,1	6,7	6,3	6,7	6,7	6,5	6,7	6,8

Примечание. * Образцы, отвечающие критериям геобарометра по составу минералов. ** Содержание калия в амфиболе (ф.ед.) *** Mg и Fe – значения константы равновесия и давления, рассчитанные по реакциям между Mg- и Fe-минералами, соответственно (см. текст).

Таблица 4. Результаты расчета P-T (кбар-°C) параметров при помощи термобарометра [24].

№		P ₀ **	T ₀	P ₁	±2σ	P ₂	±2σ	P ₃	±2σ	T ₄	±8σ	P _{средн.}	P (650°C)
40	центр	8,6	559	8,0	2,78	10,4	7,75	9,1	3,74	559	65	8,6	10,0
	край*	12,4	701	13,7	1,13	12,3	2,16	9,4	1,72	701	77	12,4	11,5
91в	центр	12,3	619	10,7	2,66	16,4	31,69	12,7	1,31	619	80	12,3	12,8
	край	14,4	694	13,7	2,66	16,2	9,07	14,5	1,49	694	84	14,3	13,6
505	центр	8,2	621	8,0	2,94	12,9	33,46	8,5	6,82	621	65	8,1	8,6
	край	10,0	675	9,0	2,88	-	-	11,1	2,99	675	71	-	-
513а*	центр	9,9	656	10,4	1,71	9,2	2,57	9,1	3,88	656	64	9,9	9,8
	край	9,4	623	10,0	1,69	8,5	2,27	8,3	4,15	623	59	9,4	9,8
518	центр	11,9	695	11,6	1,30	13,2	6,11	12,3	1,75	695	78	11,9	11,1
	край	11,9	707	12,2	1,23	12,9	4,11	11,2	1,23	707	85	11,8	10,9
519в*	центр	13,6	685	13,9	1,19	13,1	2,48	13,2	1,68	685	81	13,6	13,0
	край	13,9	674	14,3	1,08	12,7	3,36	13,2	1,81	674	75	13,9	13,5
621а*	центр	8,0	720	7,4	1,34	7,9	0,58	8,3	1,02	720	97	8,0	7,2
	край	8,2	742	7,1	1,33	8,2	0,42	8,5	0,90	742	100	8,2	7,2
628	центр	7,7	723	9,0	1,07	7,6	0,60	4,7	2,50	723	80	7,7	6,8
	край*	5,2	590	5,6	1,14	5,2	0,67	4,2	1,62	590	64	5,2	5,8
792б*	центр	8,6	586	8,7	1,35	8,2	1,79	8,8	1,61	586	65	8,6	9,7
	край	9,9	644	10,2	1,24	9,8	1,40	9,9	0,82	644	76	9,9	10,0
ОГ-6*	центр	7,6	616	6,7	1,48	7,5	0,50	8,0	0,99	616	93	7,6	7,9
	край	7,9	644	7,4	1,40	7,9	0,51	8,2	1,06	644	95	7,9	8,0

Примечание. * Образцы, отвечающие критериям термобарометра по составу минералов. ** P₀ и T₀ – исходные значения; P₁, P₂, P₃ и T₄ – параметры, рассчитанные по разным реакциям [24], P_{средн.} – среднее P; P (650°C) – среднее P при T=650°C.

сокие оценки давления (превышающие 11,5 кбар), согласно [24], могут быть несколько завышены. На основании показаний двух геобарометров можно оценить величины давления метаморфизма пород зейского комплекса в 9–14 кбар, а станového – 6–9,5 кбар.

ОЦЕНКА P-T ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММЫ THERMOCALC.

Кроме традиционной термобарометрии, расчет параметров метаморфизма метабазитов Джугджуро-Станového блока производился про помощи программы THERMOCALC (<http://www.esc.cam.ac.uk/astaff/holland/thermocalc.html>). В программе реализован разработанный ее авторами метод “средних P-T” [33]. Подробное описание метода может быть найдено в первоисточнике [33]. Суть работы программы THERMOCALC сводится к тому, что на основе внутренне согласованной термодинамической базы данных [28] рассчитываются P-T параметры для независимого набора минальных реакций. При этом методом наименьших квадратов исходные величины (ак-

тивности и энтропии образования миналов) варьируются пропорционально их неопределенностям таким образом, чтобы линии реакций пересеклись в одной точке – точке средних P-T [33]. Основные принципы практической работы с программой описаны в нашей статье [4].

Исходными данными для программы THERMOCALC являются активности миналов, которые можно вычислять при помощи специально предназначенной для этого программы AX тех же авторов (<http://www.esc.cam.ac.uk/astaff/holland/ax.html>). Кроме расчета самих активностей, AX выдает также неопределенности их вычисления, которые используются при дальнейшей работе в THERMOCALC. Наличие большого количества статистических параметров вообще является характерной особенностью этого программного комплекса. В данной работе будут упомянуты три таких параметра – σ , ρ_{PT} и σ_{fit} , где σ (в программе – sd) – сигма, стандартное отклонение (например, P или T); ρ_{PT} (cor) – коэффициент корреляции между давлением и температурой; σ_{fit} (sigfit) – величина отклонения исходных значений энтропии и

активности от использованных в расчете, нормализованного к их сигмам. Если σ_{fit} не превышает рассчитанного программой критерия хи-квадрат (χ^2), то результаты расчета находятся внутри 95% доверительного интервала.

Возможности программы THERMOCALC позволяют рассчитывать средние P-T только для парагенезисов с достаточным набором минеральных реакций. В противном случае можно производить расчет давления по заданной температуре или наоборот. Еще одной важной особенностью программы является возможность расчета P и T в присутствии водноуглекислого флюида с выбираемым соотношением активностей H_2O и CO_2 .

Нами использовалась программа THERMOCALC версии 3.2. В первую очередь была сделана оценка средних P-T в тех парагенезисах, где набор минеральных реакций позволил рассчитать оба этих параметра одновременно. Расчет производился по всем проанализированным в образце минералам (табл. 1) с участием фаз постоянного состава (главным образом кварца). Вычисления производились при условии избытка флюида разного состава (xH_2O/xCO_2). Результаты представлены в таблице 5. Из таблицы видно, что состав флюида сильно влияет на P и T образования парагенезиса. Разница между температурами образования парагенезиса при взаимодействии с чисто водным ($xH_2O=1$) и максимально углекислотным (здесь – $xH_2O=0.2$) флюидами приближается к $100^\circ C$, а для давления различие достигает 1.8 кбар. В работе [3] на основе изучения газовой фазы из минералов станового метаморфического комплекса был сделан вывод о наличии существенного количества углерода и CO_2 в метаморфическом флюиде. В связи с этим, целесообразно оценить условия P-T при $xH_2O=0.5$, имея в виду указанные смещения оценок в зависимости от состава флюида. Таким образом, все изученные образцы попадают в поле P-T с границами по температуре от 550 до $700^\circ C$ и давлению – от 7 до 14 кбар, причем давления свыше 10 кбар достигают только образцы зейской серии (табл. 5).

Для того, чтобы исключить влияние неверных расчетов T и рассмотреть изменение давления с температурой, нами были сделаны расчеты среднего давления для температур в диапазоне амфиболитовой фации при $xH_2O=0.5$. Результаты представлены в таблице 6. Интересно, что разброс в оценках давления для образцов зейского комплекса заметно меньше, чем для станового, и меньше неопределенность этих оценок. При $T=650^\circ C$ полученные значения давления ко-

леблются для пород зейского комплекса от 9 до 13.1 кбар, а станового – от 5.9 до 10.3 кбар.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из полученных оценок P-T, метабазиты Джугджуро-Станового блока по условиям метаморфизма отвечают амфиболитовой фации повышенных давлений. Примерные области P-T параметров метаморфизма изученных пород нанесены на рис. 2. Как видно из рисунка, приблизительные глубины максимального захоронения пород станового комплекса составляют 20–27 км, а зейского комплекса – 27–40 км. Интересно, что область P-T пород станового комплекса располагается в районе геотермы стабильной континентальной коры (рис. 2), тогда как породы зейского комплекса образовывались в условиях, сочетающих умеренные температуры и высокие давления, что характерно для зон субдукции. Причем породы зейского комплекса восточной части Джугджуро-Станового блока были метаморфизованы в более высокobarических условиях, чем гранулиты сутамского и, частично, зверевско-чогарского комплексов.

Геодинамическая модель, объясняющая взаимоотношения Алданского щита и Джугджуро-Станового блока с учетом повышенных давлений зейского комплекса, была предложена нами ранее [4]. Суть этой модели сводится к тому, что протерозойская перекристаллизация гранулитов юга Алданского щита и метаморфизм Джугджуро-Станового блока происходили одновременно, причем породы Джугджуро-Станового блока были субдуцированы под Алданский щит или фрагментарно подвинуты под него в результате коллизии. Различные субдукционные и коллизионные гипотезы уже не раз выдвигались в качестве причины докембрийского магматизма и регионального метаморфизма на территории современного Алдано-Станового щита [6, 8, 15, 20]. Однако общей их чертой является признание пород зверевско-чогарского комплекса, слагающих гранулитовые блоки в пределах Станового мегаблока (рис. 1), фундаментом для окружающих пород, метаморфизованных в условиях амфиболитовой фации (становой и зейский комплексы). По нашему мнению, исходя из новых оценок давления, блоки пород гранулитовой фации могут, напротив, представлять собой остатки бывшей архейской кровли, находившейся над погружающейся Становой плитой во время ее метаморфизма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что исследованные породы метаморфизованы в условиях температур типичной амфи-

Таблица 5. Результаты расчетов средних P-T (кбар-°C) при помощи программы THERMOCALC в условиях разной активности H₂O.

	xH ₂ O=1							xH ₂ O=0.8							xH ₂ O=0.5							xH ₂ O=0.2							χ ²																							
	T	σ _T *	P	σ _P	ρPТ	σ _{fit}	T	T	σ _T	P	σ _P	ρPТ	σ _{fit}	T	T	σ _T	P	σ _P	ρPТ	σ _{fit}	T	T	σ _T	P	σ _P	ρPТ	σ _{fit}	T																								
40	центр	651	41	11,6	1,3	0,834	0,68	640	40	12	1,3	0,832	0,69	625	38	11	1,3	0,830	0,72	581	35	10	1,2	0,823	0,83	1,4	край	708	48	12,8	1,6	0,833	1,18	697	47	13	1,6	0,831	1,18	680	46	12	1,5	0,829	1,19	635	44	12	1,5	0,823	1,26	1,4
	91в	центр	693	61	13,9	2,2	0,691	1,86	680	59	14	2,2	0,685	1,86	661	56	13	2,1	0,676	1,86	608	50	13	2	0,658	1,89	1,5	край	703	51	14,3	1,9	0,713	1,60	688	50	14	1,9	0,708	1,61	668	48	14	1,8	0,702	1,64	615	44	13	1,8	0,688	1,72
505	центр	606	30	9,8	1,0	0,705	1,13	593	29	9,6	1	0,701	1,14	576	28	9,3	1	0,697	1,15	528	27	8,4	1	0,689	1,23	1,4	край	624	41	10,1	1,4	0,685	1,48	610	40	9,9	1,4	0,679	1,50	592	39	9,5	1,4	0,675	1,54	541	38	8,6	1,4	0,665	1,69	1,5
	513а	центр	678	86	9,5	1,4	0,664	1,14	666	84	9,3	1,4	0,653	1,15	649	81	9,1	1,4	0,631	1,18	605	79	8,3	1,4	0,592	1,30	1,5	край	628	81	8,9	1,4	0,650	1,20	618	79	8,7	1,4	0,639	1,21	603	76	8,5	1,3	0,619	1,24	562	74	7,8	1,4	0,583	1,35
518	центр	691	40	11,8	1,3	0,771	1,25	677	39	12	1,3	0,767	1,26	656	38	11	1,3	0,762	1,29	601	36	10	1,3	0,750	1,39	1,4	край	724	43	12,9	1,5	0,778	1,30	709	42	13	1,4	0,774	1,31	688	40	12	1,4	0,768	1,32	632	37	11	1,3	0,755	1,38	1,4
	519в	центр	731	38	14,3	1,3	0,901	0,80	720	37	14	1,3	0,900	0,78	705	36	14	1,3	0,898	0,74	662	33	13	1,2	0,895	0,68	1,5	край	718	37	14,1	1,3	0,899	0,89	707	36	14	1,3	0,898	0,86	692	35	14	1,3	0,897	0,83	650	32	13	1,2	0,893	0,78
584	центр	726	84	12,1	2,6	0,963	1,02	716	90	12	2,7	0,963	1,10	702	97	12	3	0,964	1,22	664	117	11	3,6	0,964	1,57	2	край	664	78	10,3	2,3	0,962	0,49	656	77	10	2,3	0,962	0,57	643	75	10	2,2	0,962	0,68	608	72	9,8	2,2	0,963	1,02	2
	620	центр	646	46	9,9	1,6	0,719	1,46	633	46	9,6	1,6	0,714	1,52	613	46	9,3	1,6	0,711	1,60	562	48	8,4	1,8	0,702	1,88	1,5	край	655	47	10,2	1,6	0,708	1,51	641	47	10	1,6	0,703	1,56	621	47	9,6	1,7	0,699	1,65	568	48	8,7	1,8	0,688	1,92
628	центр	670	61	9,1	1,6	0,863	1,42	659	59	9	1,5	0,861	1,42	643	57	8,7	1,5	0,859	1,43	601	55	8,1	1,5	0,854	1,50	1,5	край	640	71	9,4	1,9	0,866	1,68	629	70	9,3	1,8	0,864	1,70	615	68	9	1,8	0,862	1,73	575	67	8,4	1,8	0,856	1,84	1,5
	784	центр	671	33	12,3	1,0	0,739	0,93	657	32	12	1	0,731	0,97	637	30	12	1	0,721	1,02	585	33	11	1,1	0,698	1,25	1,6	край	689	34	11,5	1,0	0,790	1,00	674	33	11	1	0,783	1,02	653	33	11	1	0,773	1,08	598	35	9,7	1,1	0,752	1,30
792б	центр	655	48	11,2	1,5	0,896	1,13	646	46	11	1,5	0,895	1,12	632	44	11	1,4	0,894	1,12	593	42	10	1,4	0,890	1,15	1,4	край	661	42	11,2	1,3	0,899	0,93	651	41	11	1,3	0,898	0,93	637	39	11	1,3	0,897	0,94	598	37	10	1,2	0,893	1,03	1,4
	ОГ-6	центр	620	46	7,4	1,4	0,635	1,2	611	44	7,3	1,4	0,634	1,1	599	41	7,2	1,3	0,636	1,1	565	34	6,8	1,1	0,637	1	1,6	край	638	49	7,4	1,5	0,642	1,2	629	46	7,3	1,4	0,641	1,2	616	43	7,2	1,3	0,644	1,1	581	36	6,8	1,2	0,645	1

Примечание. * σ_T, σ_P, ρPТ, σ_{fit}, χ² – статистические характеристики (описание см. в тексте).

Таблица 6. Результаты расчетов среднего давления (кбар) при помощи программы THERMOCALC для температур (в скобках) амфиболитовой фации при $x_{H_2O}=0.5$.

		P (550°C)			P (600°C)			P (650°C)			P (700°C)			χ^2
		P	σ_P^*	σ_{fit}	P	σ_P	σ_{fit}	P	σ_P	σ_{fit}	P	σ_P	σ_{fit}	
40	центр	9,2	0,64	1,0	10,5	0,68	0,7	11,9	0,72	0,7	13,3	0,76	0,9	1,39
	край	8,7	1,11	1,8	10,0	0,92	1,4	11,4	0,81	1,1	12,7	0,84	1,1	1,39
91в	центр	10,4	1,78	2,4	11,6	1,50	1,9	12,9	1,41	1,7	14,1	1,56	1,8	1,45
	край	10,5	1,50	2,1	11,8	1,30	1,7	13,1	1,24	1,6	14,5	1,33	1,6	1,35
505	центр	8,7	0,69	1,1	9,9	0,73	1,1	11,1	0,97	1,4	12,4	1,30	1,8	1,35
	край	8,5	0,99	1,6	9,7	0,94	1,4	10,8	1,16	1,6	12,0	1,53	2,1	1,42
513а	центр	8,0	1,02	1,3	8,5	0,94	1,1	9,1	0,95	1,1	9,6	1,05	1,1	1,49
	край	7,9	0,94	1,2	8,5	0,94	1,1	9,0	1,04	1,2	9,6	1,22	1,3	1,49
518	центр	8,5	1,05	1,8	9,7	0,85	1,4	10,9	0,79	1,2	12,2	0,88	1,3	1,35
	край	8,6	1,24	2,1	9,9	1,02	1,6	11,1	0,86	1,3	12,4	0,86	1,2	1,35
584	центр	8,5	2,63	2,3	9,3	2,23	1,8	10,1	1,82	1,4	10,9	1,42	1,0	1,96
	край	8,2	1,58	1,4	9,0	1,25	0,9	9,7	1,32	0,5	10,5	1,40	0,2	1,96
620	центр	7,7	1,21	1,8	8,9	1,03	1,4	10,1	1,15	1,5	11,4	1,51	1,9	1,49
	край	7,9	1,28	1,9	9,1	1,07	1,5	10,3	1,15	1,5	11,5	1,49	1,9	1,49
621а	центр	5,8	3,30	3,0	6,1	2,95	2,5	6,4	2,62	2,1	6,7	2,32	1,8	1,61
	край	4,9	2,43	2,8	5,4	2,13	2,3	5,9	1,88	1,9	6,4	1,69	1,6	1,54
628	центр	6,6	0,82	1,7	7,7	0,73	1,4	8,8	0,74	1,3	10,0	0,83	1,4	1,42
	край	7,5	0,86	1,7	8,6	0,84	1,6	9,8	0,90	1,6	10,9	1,04	1,7	1,42
784	центр	9,6	1,11	1,9	10,7	0,70	1,1	11,8	0,67	0,9	13,0	0,95	1,3	1,54
	край	8,6	1,08	2,1	9,6	0,71	1,3	10,7	0,57	0,9	11,9	0,71	1,2	1,54
792б	центр	8,4	0,73	1,4	9,8	0,61	1,1	11,3	0,62	1,0	12,8	0,77	1,2	1,45
	край	8,3	0,68	1,3	9,7	0,54	0,9	11,1	0,58	0,9	12,6	0,64	1,1	1,45
ОГ-6	центр	6,2	1,02	1,2	7,2	0,91	0,9	8,2	1,10	1,1	9,3	1,56	1,5	1,54
	край	5,9	1,17	1,3	6,8	0,92	0,9	7,7	0,97	0,8	8,7	1,16	1,1	1,54

Примечание. * σ_T , σ_P , ρ_{PT} , σ_{fit} , χ^2 – статистические характеристики (описание см. в тексте).

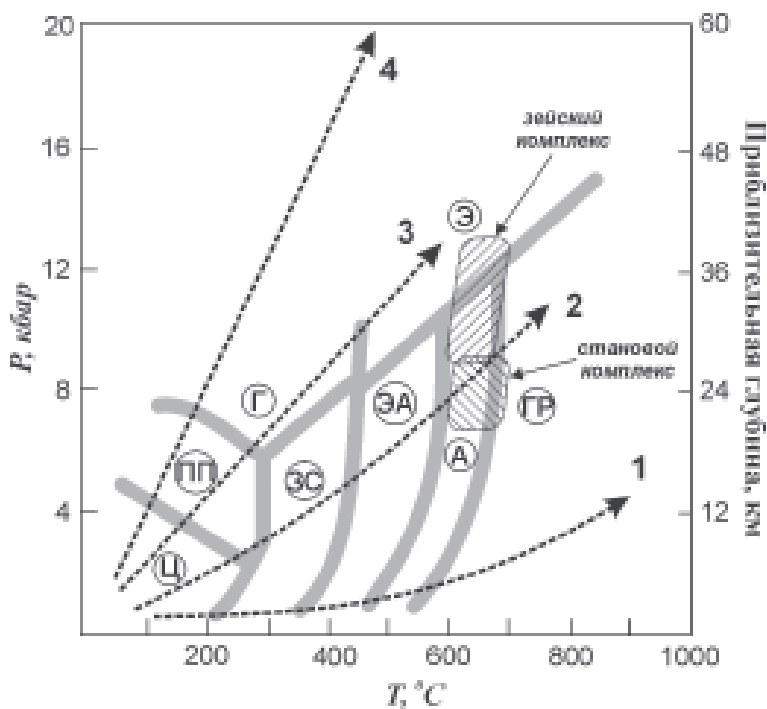


Рис. 2. Примерные области P-T метаморфизма пород становой и зейского комплексов на схеме фаций [18].

Пунктиром изображены геотермы, характерные для разных геодинамических обстановок: 1 – островных дуг и зон “горячего” рифтогенеза; 2 – в пределах стабильной континентальной коры; 3 – в зоне субдукции горячей океанической коры; 4 – в зоне субдукции остывшей океанической коры. Буквы в кружках – индексы метаморфических фаций: цеолитовой (Ц), пренит-пумпеллиитовой (ПП), зеленосланцевой (ЗС), глаукофансланцевой (Г), эпидот-амфиболитовой (ЭА), амфиболитовой (А), гранулитовой (ГР) и эклогитовой (Э).

болитовой фации (600–700°C), но при повышенных давлениях. Давление во время пика метаморфизма пород станового комплекса варьировало в пределах 6.5–9 кбар. Изученные породы зейского комплекса восточной части Джугджуро-Станового блока метаморфизованы при давлениях от 9 до 13 кбар, а, возможно, и более. Большая величина соотношения градиентов давления и температуры (dP/dT), в условиях которых образовались метабазиты зейского комплекса (рис. 2), может говорить о субдукционном генезисе данных пород.

Полученные новые данные подтверждают ранее высказанную нами точку зрения, что метаморфизм пород Джугджуро-Станового блока, происходящий в условиях повышенных давлений, вероятно, обусловлен субдукцией или поддвигом Становой плиты под Алданский щит [4]. Для более достоверного обоснования этого предположения и реальной реконструкции тектонических процессов, обусловивших преобразование Алдано-Станового щита в протерозое [30], необходимы дополнительные детальные геотермометрические, геохимические и геохронологические исследования всей территории Джугджуро-Станового блока, являющегося, по нашему мнению, ключевой структурой в составе щита.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ – 99-05-64487-а и 01-05-06075-мас.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авченко О.В. Минеральные равновесия в метаморфических горных породах и проблемы геотермометрии. М.: Наука, 1990. 181 с.
2. Авченко О.В., Попов В.С., Мишкин М.А. Минеральная геобаротермометрия гранат-пироксеновых кристаллосланцев сутамского метаморфического комплекса // Геология и геофизика. 1994. № 12. С. 75–85.
3. Авченко О.В., Александров И.А., Худоложкин В.О., Ковалова Н.П. Состав и генезис флюидной фазы из минералов станового метаморфического комплекса // Тихоокеан. геология. 2000. Т. 19, № 3. С. 55–64.
4. Александров И.А., Авченко О.В. Сравнительная термометрия метаморфических комплексов и геодинамическая модель взаимоотношения Алданского и Джугджуро-Станового блоков Алдано-Станового щита // Тихоокеан. геология. 2002. Т. 21, №5. С. 3–14.
5. Гаврикова С.Н., Николаева Л.Л., Галанин А.В. и др. Ранний докембрий южной части Становой складчатой области. М.: Недра. 1991. 171 с.
6. Гаврикова С.Н., Соколов С.Ю., Орлов В.Н. Петрогенезис позднеархейских гранитоидов Становой раннедокембрийской области (Восточная Сибирь, Россия) // Геохимия. 1993. №2. С. 208–221.
7. Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий. 1:2500000. Объясн. зап. СПб., 1999. 135 с.
8. Ларин А.М., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Глебовицкий В.А., Ковач В.П., Бережная Н.Г., Яковлева С.З., Толкачев М.Д. Позднеархейские гранитоиды Дамбукинского блока Джугджуро-Становой складчатой области: формирование и преобразование континентальной коры в раннем докембрии // Петрология. 2004. Т. 12, №3, С. 245–263.
9. Карсаков Л.П. Становая складчатая система, ее границы, структурно-вещественные комплексы // Современные тектонические концепции и региональная тектоника СССР. Якутск: СО АН СССР, 1980. С. 142–144.
10. Карсаков Л.П. Раннедокембрийские комплексы в структуре Восточной Азии // Дис... д-ра геол.-минер. наук. Хабаровск, 1995. 88 с.
11. Кастыркина В.М. Метаморфизм центральной части Джугджуро-Становой складчатой области // Метаморфизм раннего докембрия в районе БАМ. Л., 1983. С. 140–163.
12. Козырева И.В., Авченко О.В., Мишкин М.А. Глубинный метаморфизм позднеархейских вулканогенных поясов. М.: Наука, 1985. 165 с.
13. Маракушев А.А. Проблемы минеральных фаций метаморфических и метасоматических горных пород. М.: Наука, 1965. 327 с.
14. Мишкин М.А., Авченко О.В. К петрологии метаморфических пород Становой складчатой области // Докембрийские комплексы зоны БАМ. Владивосток, 1979. С. 91–111.
15. Перчук Л.Л., Кицул В.И., Аранович Л.Я., и др. Петрология гранулитов Алданского щита. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. 82 с.
16. Перчук Л.Л. Взаимосогласование некоторых Fe–Mg-геотермометров на основе закона Нернста: Ревизия // Геохимия. 1989. № 5. С. 611–622.
17. Решения Четвертого межведомственного регионального стратиграфического совещания по докембрию и фанерозою юга Дальнего востока и Восточного Забайкалья. Хабаровск. 1990.
18. Складков Е.В., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Мазукабзов А.М., Сизых А.И., Буланов В.А. Метаморфизм и тектоника: Учебное пособие. М: Интермет Инжиниринг, 2001. 216 с.
19. Судовиков Н.Г., Глебовицкий В.А., Другова Г.М., Крылова М.Д., Неелов А.Н., Седова И.С. Геология и петрология южного обрамления Алданского щита. Л.: Наука, 1965. 290 с.
20. Фонарев В.И., Гаврикова С.Н., Султанов Д.М. Метаморфические события в докембрии на юге Алданского щита, Восточная Сибирь // Петрология. 1995. Т. 3, № 2. С. 173–184.
21. Шемякин В.М., Глебовицкий В.А., Бережная Н.Г. и др. О возрасте древнейших образований Сутамского блока (Алданский гранулитогнейсовый ареал) // Докл. РАН. 1998. Т. 360, № 4. С. 526–529.
22. Шульдинер В.И., Панченко И.В., Шульдинер И.С. Петрология метаморфических комплексов бассейна р. Нюкжи // Метаморфизм раннего докембрия в районе БАМ. Л., 1983. С. 127–139.
23. Bhattacharya A., Mohanty L., Maji A., Sen S.K., Raith M. Non-ideal mixing in the phlogopite-annite binary: constraints from experimental data on Mg-Fe partitioning and a reformulation of the biotite-garnet geothermometer // Contribution

- to Mineralogy and Petrology. 1992. V.111. P. 87–93.
24. Dale J., Holland T.J.B., Powell R. Hornblende-garnet-plagioclase thermobarometry: a natural assemblage calibration of the thermodynamics of hornblende // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 2000. V. 140. P. 353–362.
 25. Frost B.R., Avchenko O.V., Chamberlain K.R., Frost C.D. Evidence for Proterozoic remobilization of the Aldan shield and implications for Proterozoic plate tectonic reconstructions of Siberia and Laurentia // *Precambrian Res.* 1998. V. 89. P. 1–23.
 26. Graham C.M., Powell R.A. garnet-hornblende geothermometer: calibration, testing and application to the Pelona Schist, Southern California // *J. metamorphic Geol.* 1984. V. 2. P. 13–31.
 27. Hackler R.T., Wood B.J. Experimental determination of Fe and Mg exchange between garnet and olivine and estimation of Fe-Mg mixing properties in garnet // *Amer. Mineral.* 1989. V. 74. P. 994–999.
 28. Holland T.J.B., Powell R. An internally-consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest // *Journal of Metamorphic Geology*. 1998. V. 16. P. 309–343.
 29. Kohn M.J., Spear F.S. Two new geobarometers for garnet amphibolites, with applications to southeastern Vermont // *Amer. Mineral.* 1990. V. 75. P. 89–96.
 30. Nutman A.P., Chernyshev I.V., Baadsgaard H., Smelov A.P. The Aldan shield of Siberia, USSR: the age of its Archean components and evidence for widespread reworking in the mid-Proterozoic // *Precambrian Res.* 1992. V. 54. P. 195–210.
 31. Perchuk L.L., Aranovich L.Ya., Podlesski K.K., Lavrent'eva I.V., Gerasimov V.Yu., Fed'kin V.V., Kitsul V.I., Karsakov L.P., Berdnikov N.V. Precambrian granulites of the Aldan Shield, Eastern Siberia, USSR // *Journ. Metamorphic Geol.* 1985. V. 3. P. 265–310.
 32. Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet-clinopyroxene geothermometer revisited // *J. Metamorphic Geol.* 1985. V.3. P. 231–243.
 33. Powell R., Holland T.J.B. Optimal geothermometry and geobarometry // *Amer. Mineral.* 1994. V. 79, N. 1, 2, P. 120–134.

Поступила в редакцию 14 августа 2005 г.

Рекомендована к печати А.И. Ханчуком

I.A. Alexandrov

High pressure metamorphism of amphibolite facies rocks of the Dzhugdzhur-Stanovoy block (Eastern Siberia)

Geothermobarometry of amphibolite facies rocks of the Dzhugdzhur-Stanovoy block (Eastern Siberia) was carried out on the basis of the new microprobe analysis. It is established that metamorphism of the Zeya and Stanovoy rocks occurred in a temperatures range of 600 to 700°C. Lithostatic pressure evaluations for the Stanovoy complex rocks range in between 6.5 and 9 kbar; whereas the values for metamorphic rocks of the Zeya complex are from 9 to 13-14 kbar. Metamorphism of the Dzhugdzhur-Stanovoy block is related to widespread reworking of the Aldan-Stanovoy shield in the Late paleo-Proterozoic (~1.9 Ga). In terms of geodynamics, the cause of the reworking could be subduction (or partial underthrust during continental collision) of the Stanovoy plate beneath the southern edge of the Aldan shield.

Key words: Aldan-Stanovoy shield, metamorphism, geothermobarometry, geodynamics, THERMOCALC.