

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ТЕРМОБАРОМЕТРИЯ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМООТНОШЕНИЯ АЛДАНСКОГО И ДЖУГДЖУРО-СТАНОВОГО БЛОКОВ (АЛДАНО-СТАНОВОЙ ШИТ)

И.А. Александров, О.В. Авченко

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток

Описана методика расчета оценок давления и температуры образования минеральных ассоциаций на основе программы TERMOCALC. Определены РТ-условия образования гранулитов сугамского комплекса (Алданский блок) и метаморфических пород зейского и станового комплексов (амфиболитовая фация метаморфизма, Джугджуро-Становой блок). Установлено, что глубинность формирования метаморфических пород Джугджуро-Станового блока не уступает, а порой превышает уровень глубинности гранулитов юга Алданского блока. На этой основе, дополняемой современными данными изотопного возраста, предложена новая геодинамическая модель взаимоотношения Алданского и Джугджуро-Станового блоков (Алдано-Становой шит), согласно которой метаморфизм Джугджуро-Станового блока в протерозое тесно связан с протерозойской перекристаллизацией Алдано-Станового щита и происходил в условиях субдукции Становой плиты под Алданский блок.

Ключевые слова: метаморфизм, термобарометрия, программа TERMOCALC, геодинамика, субдукция, Джугджуро-Становой блок, Алданский блок, Алдано-Становой щит.

ВВЕДЕНИЕ

В определении условий образования метаморфических пород различаются два подхода. При первом подходе (назовем его для простоты «минералогическим») исследователь берет экспериментальные минералогические термобарометры и на их основе пытается определить Р и Т образования метаморфических пород. Однако такие термобарометры существуют только для очень ограниченного круга минеральных равновесий, распространенных, как правило, в условиях довольно высоких температур метаморфизма. Другим недостатком такого подхода является совершенно не ясная сопоставимость разных термобарометров между собой в отношении выходных величин. Например, имеются для определения Р и Т образования гранулитовых пород гранат-ортопироксеновый и гранат-кордиеритовый термобарометры, а для оценки условий образования метаморфических пород, метаморфизованных в условиях амфиболитовой фации, популярен амфибол-гранат-плагиоклазовый термобарометр. Можно задать себе такие вопросы: на какой основе можно сравнить между собой показания этих двух столь разных термобарометров, какова точность их оценок Р и Т относительно друг друга? Ответа на этот вопрос нельзя получить при данном подходе и, следовательно, не возможно корректно оценить глубинность метаморфизма разнотемпературных, например, амфиболитовых и гранулитовых комплексов относительно

друг друга. Второй подход (назовем его «минальным») основан на изучении термодинамических свойств всех минальных реакций, которые можно написать для данного парагенезиса, на основании чего, с учетом моделей твердых растворов минералов, производится оценка Р и Т данного минерального равновесия. Преимуществом второго метода является то, что оценка термодинамических свойств минальных реакций изначально производится на основе согласованной термодинамической информации. Эта информация является как бы единой для высокотемпературных и низкотемпературных минеральных равновесий, что и позволяет корректно провести сравнительную оценку условий образования разнотемпературных метаморфических минеральных ассоциаций. Второй метод освещался в ряде работ [1, 17, 19, 21 и др.], но мало известен в российской петрологической литературе.

На протяжении целого ряда лет минальный подход последовательно развивали английские ученые Роджер Пауэлл и Тим Холланд, которые создали программу TERMOCALC [20, 21, 26, 27] и опубликовали ее в сети ИНТЕРНЕТ. Данная статья призвана кратко описать основные принципы работы TERMOCALC и оценить условия образования разнотемпературных метаморфических комплексов Восточной Сибири на основе работы этой программы. Главный упор, однако, мы сделаем на сравнительной оценке давления метаморфизма амфиболитовых и

гранулитовых комплексов Восточной Сибири, которая даст возможность в свою очередь подойти к определенным геодинамическим реконструкциям их становления.

ОБЩИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММЫ THERMOCALC

В использованной версии этой программы (2.75) даются взаимосогласованные термодинамические данные для 154 твердых миналов, 22 жидких и флюидных фаз и 13 расплавных фаз. Поэтому столь обширная база данных способна описать термодинамику основных породообразующих минералов: оливинов, гранатов, полевых шпатов, слюд, роговых обманок, карбонатов и других минералов в широком диапазоне температур и давлений с участием флюидных компонентов и некоторых расплавных фаз. На основе этой программы можно получить термодинамические свойства всех возможных минальных реакций и отдельных миналов, рассчитать формулы минералов и активности миналов, построить петрогенетические решетки многокомпонентных систем с учетом переменной железистости и глиноземистости минералов, оценить условия образования отдельных минеральных парагенезисов в очень широком диапазоне температур и давлений с учетом погрешности определения этих оценок. В данной статье мы более детально разберем последнюю возможность. Информация о программе THERMOCALC на основе свободного доступа помещена на сайте:

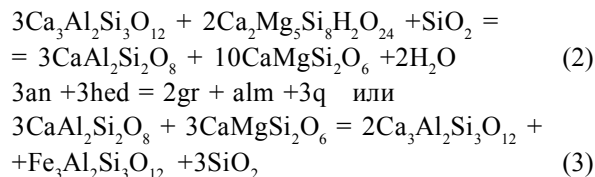
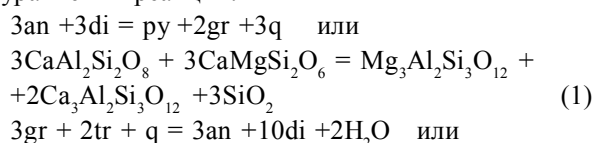
<http://rubens.its.unimelb.edu.au/~rpowell/THERMOCALC/THERMOCALC.html>

Естественно, авторы статьи могут также представить эту программу и прояснить некоторые вопросы ее работы всем желающим.

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ THERMOCALC

Основной принцип, заложенный в программе – расчет термодинамических свойств конкретных минальных реакций, в зависимости от реальных сосуществующих минералов в данной породе. Работу этого принципа покажем на примере.

Предположим, что в породе сосуществуют некоторые минералы, слагающие парагенезис: Gr (гранат), Pl (плаггиоклаз), Crx (клинопироксен), Орх (ортотипироксен), Нб (роговая обманка) и Q (кварц). Тогда между миналами этих минералов в общем случае можно написать несколько стехиометрических соотношений (реакций). Например, могут написаны такие уравнения реакций:



где an, di, hed, py, gr, alm, tr, q – анортит, диопсид, геденбергит, пироп, гроссуляр, альмандин, тремолит, кварц – миналы, входящие в состав минералов парагенезиса – плаггиоклаза, клинопироксена, граната, роговой обманки и кварца. Помимо реакций (1)-(3) для парагенезиса Gr+Pl+Crx+Orх+Нб+Q можно написать еще и другие соотношения (общим числом примерно 150!), которые мы здесь не будем выписывать.

Для каждого соотношения, подобного (1)-(3), можно написать следующее термодинамическое уравнение, подробный вывод которого приводится в работе О.В. Авченко [1]:

$$0 = \Delta H_i + \Delta S_i \times T + \Delta V_i \times P + R \times T \times \ln K_p, \quad (4)$$

где i – номер реакции, ΔH_i – энтальпийный, ΔS_i – энтропийный, ΔV_i – объемный эффекты реакции i, R – газовая постоянная, P, T – температура и давление, при которой рассчитывается реакция.

Величина $\ln K_p$ – натуральный логарифм константы равновесия реакции, выражение которой для реакции (1) записывается в следующем виде:

$$K_p = (a_{py}) \times (a_{gr})^2 / (a_{an})^3 \times (a_{di})^3 \quad (5)$$

где a_{py} , a_{gr} , a_{an} , a_{di} – активности миналов пироба, гроссуляра, анортита, диопсида, входящих в состав реальных минералов парагенезиса. Степенные показатели при активностях миналов представляют собой стехиометрические коэффициенты уравнения реакции, а сами активности миналов рассчитываются на основе определенных термодинамических моделей, исходя из реальных составов минералов, получаемых на основе микронзондовых или других анализов. Активности миналов, совпадающих по составу с минералом, равны единице, поэтому в уравнении константы равновесия отсутствует активность кварца. Именно через константу равновесия реакций учитывается состав минералов в природных ассоциациях в оценках P и T минерального парагенезиса.

Если параметры ΔH , ΔS , ΔV обозначить через коэффициенты a, b, c, то уравнение (4) напишется в таком виде:

$$0 = a + b \times T + c \times P + R \times T \times \ln K_p \quad (6)$$

Именно в таком виде в программе THERMOCALC приводятся термодинамические уравнения для каждой минальной реакции, причем размерность единиц в уравнениях реакций выражена в килоджоулях, градусах Кельвина и килобарах. Коэффициенты a, b, c для уравнения (6) и ему подобным рассчитываются в программе автоматически для данных P и T на основе термодинамических соотношений, включающих

уравнения теплоемкости. Термодинамические уравнения реакций типа (6) в первом приближении отвечают прямым линиям, поскольку коэффициенты a , b , c с изменением P и T меняются незначительно. Поэтому для вычисления P и T иногда достаточно всего двух уравнений, имеющих общую точку пересечения. Но в других случаях даже расчет многих уравнений не дает возможности получить оптимальные оценки P и T из-за большой неопределенности или неточности термодинамических данных. Наибольшая неопределенность для уравнений типа (6) существует для энтальпийного эффекта реакций и оценок активностей миналов в выражении константы равновесия. Неопределенность энтальпийного эффекта связана с экспериментальными неточностями в оценке стандартной энтальпии миналов, а неопределенность в величинах активностей миналов обусловлена применением различных и в общем случае несогласованных термодинамических моделей для описания твердых растворов минералов. Важной особенностью программы THERMOCALC является как раз учет неопределенности термодинамической информации по энтальпийному эффекту и величинам активностей миналов.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

На первом этапе с помощью отдельной специальной программы, входящей в программный комплекс THERMOCALC, вычисляются все активности миналов, входящих в минералы парагенезиса. Одновременно при этом автоматически рассчитывается кристаллохимическая формула минерала. Активности миналов на первом этапе рассчитываются при произвольно заданных параметрах P и T , исходя из общих соображений об условиях метаморфизма пород. После этого создается специальный файл (thd**.txt), в котором записываются названия миналов и их активности. После этого входим в расчетный блок THERMOCALC (tcalc27.exe). Программа даст на выбор три варианта расчета: для оценки давления (при заданной температуре), для оценки температуры (при заданном давлении) и для оценки средних параметров P и T . Третий случай расчета не всегда возможен, потому что не всегда хватает набора

минальных реакций для одновременного определения P и T . В этом случае надо попытаться определить температуру (давление) минерального равновесия на основе какого-нибудь более или менее надежного экспериментального термометра (барометра), а затем оценить давление (температуру) по THERMOCALC при известной температуре (давлении). В каждом варианте расчета на входе надо задать еще приблизительный интервал оценок P и T , исходя из общих соображений. Рассмотрим подробнее отдельные варианты расчета.

Оценка средних параметров P и T

Для этого примера мы возьмем образец основного кристаллосланца из охотского метаморфического комплекса, состоящего из минералов Gr, Pl, Crx, Opx, Hb, Q (обр. А-33, [1]). После проведения расчетов для оценки средних параметров P и T по вышеуказанной схеме программа создаст выходной файл (tho**.txt), который состоит из нескольких информационных частей. В первой части (табл. 1) даются активности (a) миналов и их неопределенности ($sd\ a/a$), рассчитанные при заданной, но выбранной из каких-то соображений температуре и принятом составе флюида (в нашем примере $X_{H_2O} = 0.8$; $X_{CO_2} = 0.2$).

Во второй части этого файла приводятся минальные реакции (из числа линейно независимых), средние оценки давления для каждой реакции, коэффициенты a , b , c , величины $\ln K_p$ и величины неопределенностей по давлению ($sd(P)$), по энтальпии реакции ($sd(a)$) и логарифму константы равновесия ($sd(\ln K_p)$). В этой части файла величина давления и остальные параметры реакции рассчитываются для средней температуры заданного на входе температурного интервала (табл.2).

Оценки давления и термодинамические параметры линейно независимых реакций

Наконец, в третьей, основной части файла даются найденные наиболее вероятные оценки P и T , их неопределенности – $sd(P)$ и $sd(T)$ – и некоторые статистические параметры. Важной особенностью этой части файла является вывод на печать оценок P и T в зависимости от вычисленной неопределенности

Таблица 1. Активности миналов и их неопределенности.

минал	an	ab	py	gr	alm	di	hed	cats
a	0.670	0.520	0.0096	0.0131	0.180	0.530	0.310	0.021
sd a/a	0.05	0.0691	0.5581	0.5257	0.1706	0.0662	0.1178	0.4762
минал	tr	en	fs	ts	fact	parg	q	H ₂ O
a	0.0076	0.240	0.23	0.00007	0.0015	0.0112	1	0.2
sd a/a	0.4998	0.1732	0.1625	2.3904	0.7941	0.5462	0	0

Примечание. an – анортит, ab – альбит, py – пироп, gr – гроссуляр, alm – альмандин, di – диопсид, hed – геденбергит, cats – Ca-чермакитовый пироксен (Ca-Tschermak pyroxene – CaAl₂SiO₆), tr – тремолит, en – энстатит, fs – ферросилит, ts – чермакит (Ca₂Mg₃Al₄Si₆O₂₄H₂), fact – ферроактинолит, parg – паргасит, q – кварц.

Таблица 2. Линейно независимые реакции для обр. А-33, их параметры и оценка давления ($T=750^{\circ}\text{C}$, $X_{\text{H}_2\text{O}} = 0.2$; $X_{\text{CO}_2}=0.8$).

Минальные реакции

- 1) cats + q = an
- 2) 3di + 3cats = py + 2 gr
- 3) 3hed + 3 cats = 2gr + alm
- 4) 3cats + 3fs = gr + 2 alm
- 5) 3cats + 3en = 2py + gr
- 6) 2py + 4gr + 3ts + 12q = 12an + 3tr
- 7) 21an + 6fact = 11gr + 10alm + 27q + 6H₂O
- 8) 12an + 18di + 3parg = 3ab + 5py + 10gr + 3 tr
- 9) 12an + 5alm + 18di + 3parg = 3ab + 10py + 10gr + 3fact

Оценки давления и термодинамические параметры линейно независимых реакций

№ реакции	P	sd(P)	a	sd(a)	b	c	lnK _p	sd(lnK _p)
1	5.4	2.60	-17.57	0.24	-0.018	1.416	3.463	0.479
2	8.9	5.47	-51.72	0.94	0.078	-2.629	0.178	1.870
3	8.0	5.59	-29.36	0.59	0.036	-2.691	2.244	1.958
4	7.7	4.73	-105.83	2.20	0.100	-2.982	4.718	1.817
5	7.9	3.70	-88.04	1.54	0.056	-3.414	8.234	1.634
6	4.8	2.73	-35	6.88	0.375	21.881	35.893	7.727
7	6.3	1.13	32.21	11.99	-0.475	-53.595	-17.411	7.764
8	6.7	1.80	-15.66	5.70	0.663	-27.806	-53.469	6.495
9	9.5	2.52	268.08	7.99	0.579	-25.65	-72.997	8.348

активности каждого минала (табл. 3). Это позволяет учесть изменение оценок P и T от одного из наименее известного параметра термодинамического уравнения реакций – величины активности того или другого минала. Если вычисленные оценки P и T значительно (по температуре примерно на 100–200°C, а по давлению 4–6 кбар) отличались от оценок P и T, которые принимались на входе для первоначального расчета активностей, то весь расчет надо повторить, задавая на входе уже полученные оценки P и T. Обычно двух или трех приближений вполне достаточно для хорошего расчета.

В таблице 3 приводятся некоторые статистические параметры – *сог*, *fit*, *e**, *hat*. Они нужны, главным образом, для дальнейшего уточнения полученных оценок P и T, если погрешность расчетов слишком велика. Пользуясь этой информацией, можно исключить какой-нибудь наиболее «плохой» минал из входного файла, если это возможно, и провести расчет, основываясь на остальных реакциях. В выходном файле дается информация о величинах, которые не должны превышать статистические критерии *fit*, *e**, *hat*. Для нашего примера предельная величина *fit* должна быть меньше 1.42, *e** – меньше 2.5, *hat* – меньше 0.56.

Величина *hat* отражает степень влияния активности каждого минала на смещение P-T оценок. Эта величина может изменяться в диапазоне 0.0–1.0, причем нулевое значение показывает отсутствие влия-

ния, а единица – фиксирование P-T оценок данным миналом. С этой точки зрения активность тремолита достаточно сильно смещает оценку P-T, в отличие от активности миналов плагиоклаза (табл.3). Величина *e** представляет собой нормированную неопределенность активности каждого минала. В нашем примере она значительно меньше предельной оценки.

Величина *fit* связана с доверительными интервалами оценок P и T. Если оценки *fit* не превышают предельных величин, то оценки P-T находятся внутри 95% доверительного интервала. Для нашего примера *fit* примерно постоянна и значительно меньше предельной величины. Наконец, величина *сог* отражает корреляционную связь между давлением и температурой каждого уравнения, прямо не связана с достоверностью вычисляемых параметров, но позволяет оценить зависимость каждого минального уравнения от температуры и давления.

Таким образом, оценки P = 8 кбар и T = 852°C в обр. А-33 статистически надежны. Изменение состава флюида до максимально водного ($X_{\text{H}_2\text{O}} = 1.0$) незначительно (на 0.2–0.3 кбар) повышает оценку давления.

Оценка давления (температуры) при заданной температуре (давлении)

Могут быть варианты, когда невозможно найти оба параметра P и T или в силу нехватки некоторых минальных реакций, или в силу большой не-

Таблица 3. Средние параметры P (кбар) и T (°C), их неопределенности и некоторые статистические оценки для обр. А-33 (охотский комплекс, [1]).

минал	P	sd (P)	T	sd (T)	cor	fit	e*	hat
an	8.01	1.20	852	57	0.458	1.16	0.10	0.05
ab	7.95	1.13	851	58	0.481	1.16	0.09	0.00
py	8.11	1.17	861	60	0.537	1.15	0.49	0.16
gr	7.74	1.20	854	57	0.425	1.15	0.55	0.24
alm	7.60	1.23	853	56	0.412	1.13	0.49	0.17
di	7.77	1.12	842	57	0.512	1.13	0.61	0.05
hed	8.03	1.05	865	54	0.485	1.08	1.03	0.04
cats	8.29	1.09	864	54	0.510	1.08	-1.31	0.11
tr	7.59	1.19	824	67	0.592	1.12	-0.75	0.36
en	8.01	1.10	836	60	0.417	1.13	0.66	0.19
fs	7.59	1.19	854	55	0.419	1.12	0.75	0.23
ts	7.96	1.08	849	55	0.481	1.11	1.03	0.01
fact	8.32	1.04	870	53	0.516	1.04	1.48	0.11
parg	7.95	1.10	838	60	0.449	1.13	-0.73	0.20
q	7.95	1.13	852	57	0.483	1.17	0	0
H ₂ O	7.94	1.14	851	58	0.490	1.17	0.07	0.01
среднее	8.0	1.10	852	57	0.483	1.17	-	-

Таблица 4. Активности миналов в обр. 2157-г (P = 8 кбар, T = 550°C).

an	py	gr	alm	di	hed	cats	ep	cz	fep	q
0.540	0.00155	0.110	0.047	0.48	0.37	0.151	0.120	0.860	0.00092	1

Примечание. an – анортит, py – пироп, gr – гроссуляр, alm – алмадин, di – диопсид, hed – геденбергит, cats – Са-чермакиновый пироксен (Ca-Tschermak pyroxene – CaAl₂SiO₆), ep – эпидот, cz – клиноцоизит, fep – Fe-эпидот, q – кварц.

определенности полученных по TERMOCALC уравнений. В других примерах пересечение двух линий минальных реакций на P-T диаграмме происходит под очень острыми углами, что приводит к появлению большой неопределенности либо по давлению, либо по температуре. Еще одни осложнения бывают в примерах равновесий с водосодержащими миналами, когда вариации состава флюида сильно сказываются на вычисляемых параметрах. В этих случаях можно попытаться найти один параметр (P или T), задавая или выбирая значение другого на основе каких-либо дополнительных соображений. Рассмотрим некоторые детали вычислений на примерах обр. 2157-г и обр. 86-е из пород зейского комплекса Джугджуро-Станового блока [9].

Обр. 2157-г состоит из граната, клинопироксена, цоизита, плагиоклаза и кварца. По составам минералов рассчитываем активности миналов (табл. 4).

После проведения расчетов были получены следующие величины (табл. 5).

Из таблицы 5 видно, что с увеличением мольной доли CO₂ во флюиде оценки P и T заметно смещаются в область более низких значений. Но известно [9], что температура метаморфизма зейского комплекса вряд ли могла быть меньше 550°C. Кроме того, гранат-клинопироксеновый термометр [28] в данном образце показал температуру в 541°C. Отсю-

Таблица 5. Оценки P (кбар) и T (°C), их неопределенности (в скобках) и состав флюида в обр. 2157-г.

P	T	X _{H₂O}	X _{CO₂}
6.6(1.7)	483(55)	0.2	0.8
8(1.9)	561(62)	0.8	0.2
8.3(1.9)	577(64)	1.0	0.0

Таблица 6. Оценка P (кбар), ее неопределенность (в скобках) и состав флюида в обр. 86-е при T= 614(°C).

P	X _{H₂O}	X _{CO₂}
13.5(1.7)	0.1	0.9
11.9(1.9)	0.5	0.5
11.3(1.9)	1.0	0.0

да приходим к выводу, что давление минерального равновесия в обр. 2157-г было близко к 8 кбар.

В обр. 86-е сосуществуют гранат, биотит, эпидот, плагиоклаз и кварц. Для этих минералов TERMOCALC дает 14 минальных уравнений, однако все они идут под близкими наклонами, что не дает возможность оценить P и T одновременно. Однако гранат-биотитовый термометр [10] дал оценку в 614°C. Задавая разное соотношение мольных долей X_{H₂O} и X_{CO₂} во флюиде мы получили следующую оценку давления (табл. 6).

Как видно из таблицы 6, в обр. 86-е можно принять оценку давления, близкую к 11.5 кбар, поскольку чисто водный или чисто углекислый метаморфогенный состав флюида маловероятен. Подчеркнем то обстоятельство, что мы смогли с расчетом погрешности определения оценить давление в минеральных парагенезисах Gr-Bi-Ep-Pl-Q и Gr-Cpx-Zo-Pl-Q, для которых нет надежных геобарометров.

Перейдем к анализу оценок P и T, рассчитанных с помощью TERMOCALC для гранулитов юга Алданского блока и метаморфических пород Джугджуро-Станового блока.

Гранулиты сутамского комплекса (юг Алданского блока)

Сутамский метаморфический комплекс развит на юге Алданского блока (Алдано-Становой щит) в бассейне р. Сутам. На юге он граничит с докембрийским Джугджуро-Становым блоком, а на западе, севере и востоке по серии разломов он соприкасается с породами западной и восточной частей алданской гранулитогнейсовой области. Вопросам петрологии, геохимии, литологии сутамского комплекса посвящено значительное число работ [2, 13, 25]. По данным работы [13] в составе сутамского комплекса выделяется две толщи: нижняя – однообразная мощная толща гиперстерновых плагиогнейсов с некоторой долей метабазитов; верхняя – толща переслаивания гиперстеновых гнейсов с различными гнейсами и кварцитами. Возраст протолитов кристаллосланцев основного и ультраосновного состава, залегающих согласно с вмещающими эндербитовыми гнейсами, составляет 3067 ± 130 млн лет (Sm-Nd метод, [14]), возраст гранулитового метаморфизма определяется изотопной датировкой 2856 ± 140 млн лет [13].

В настоящей работе об условиях метаморфизма сутамского блока мы намереваемся ответить на два вопроса:

- 1) каковы максимальные оценки давления сутамского метаморфизма?
- 2) какова степень однородности или выдержанности оценок давления метаморфизма по площади выхода сутамского комплекса?

Уже в первых петрологических работах, посвященных условиям метаморфизма сутамского комплекса, было обращено внимание на специфический парагенезис ортопироксен-силлиманит-кварц (Orx + Sill + Q), и высокую магнезиальность граната в парагенезисе с кордиеритом [11]. Оба эти признака позволили выделить сутамскую фацию глубинности гранулитового метаморфизма [11] как наиболее глубинную и высокотемпературную, сравнительно с другими фациями метаморфизма, наблюдающимися на Алдано-Становом щите. С развитием количественной термобарометрии появились количествен-

ные оценки условий сутамского метаморфизма. Одна из наиболее детальных работ, посвященных петрологии гранулитов Алданского блока [25], показала, что максимальные оценки сутамского метаморфизма достигают примерно 830°C по температуре, при давлении до 9.2 кбар. При этом максимальные параметры P и T отмечались в среднем течении р. Сутам, а в верхнем его течении оценки P и T были значительно ниже – до 750°C и 8 кбар [25]. Однако, поскольку все породы Сутамского блока испытали регрессивную перекристаллизацию, в конечном счете, вопрос об однородности условий метаморфизма остался открытым. Он получил разрешение в работе [2]. В этой работе для оценки параметров PT применялись Gr-Orx-Pl-Q экспериментальный барометр [5] и Gr-Orx термометр [2]. Оказалось, что в сутамском комплексе выделяется два блока: оценки условий метаморфизма первого блока составляют 6.1–7.2 кбар, $750\text{--}810^\circ\text{C}$, второго – 3.8–6.1 кбар, $627\text{--}778^\circ\text{C}$. Более низкобарный и низкотемпературный второй блок располагается в верхнем течении р. Сутам, выше впадения р. Гидат, в междуречье левых притоков р. Сутам – р. Тас-Юрях и р. Усмун. [2]. Более высокобарный и высокотемпературный блок размещается в среднем течении р. Сутам, ниже впадения р. Гидат. Таким образом, название сутамская фация глубинности можно с некоторой долей условности относить только к метаморфическим породам первого блока. Количественные оценки сутамского метаморфизма, приведенные в работе [2], можно подвергать сомнению, поскольку абсолютная точность показаний геотермобарометров определяется достаточно произвольно. Но вывод о неоднородности сутамского метаморфизма должен быть вполне справедлив, поскольку разноглубинное положение двух блоков устанавливается на показаниях одних и тех же экспериментальных геобарометров и в одном и том же парагенезисе Gr-Orx-Pl-Q. Причем в работе [2] изучались тщательно отобранные образцы, в которых реакционные структуры отсутствовали, а эффекты регрессивной переработки пород были невелики или отсутствовали.

Мы можем сейчас применить программу TERMOCALC для оценки условий метаморфизма сутамского комплекса, что даст возможность оценить абсолютную точность ранее вычисленных оценок P и T.

Из таблицы 7 видно, что если рассчитывать давление сутамского метаморфизма при температуре Gr-Orx равновесия, определяемой по термометру работы [2], то расхождение оценок давления, рассчитанных по TERMOCALC и геобарометру [5], составляет не более 1 кбар. Поскольку работа TERMOCALC и геобарометра [5] основана на совершенно разных подходах (геобарометр Графчикова и Фонарева – эксперимен-

Таблица 7. Сопоставление оценок давления (кбар), вычисленных по программе TERMOCALC, с оценками давления, найденными по экспериментальному геобарометру [5].

Номер блока*	№ образца	Температура (°C) по Gr-Орх термометру [2]	Оценка P [5]	Оценка P по TERMOCALC
2	18669/3	720	4,9	5,9 (1,3)**
2	18659/3	809	7,1	6,7 (2,3)
2	32-А	778	6,1	7,0 (0,8)
2	412-6	695	4,4	5,4 (1,8)
2	37-Б	768	5,4	6,5 (1,0)
1	М-57-Б	810	7,2	8,2 (0,9)
1	А-420-5	778	6,9	7,8 (1,1)
1	663-4	751	6,1	7,2 (1,1)
1	А-424	777	7,2	8,0 (0,9)
1	А-430-1	750	7,0	7,8 (0,9)
1	93-Г-1	798	7,0	7,8 (0,9)

Примечание. * 1 – высокобарный блок; 2 – низкобарный блок. ** величина в скобках – неопределенность оценки давления (кбар) по программе TERMOCALC.

Таблица 8. Оценки давления метаморфизма сутамского комплекса и величины их неопределенности при заданной температуре в 900°C (программа TERMOCALC).

Номер блока*	№ образца	Оценка P по TERMOCALC
2	18669/3	7,4 (1,2)**
2	18659/3	7,5 (1,8)
2	32-А	8,5 (0,9)
2	412-6	7,0 (1,5)
2	37-Б	7,9 (1,2)
1	М-57-Б	9,3 (0,9)
1	А-420-5	8,8 (1,3)
1	663-4	9,0 (1,1)
1	А-424	9,2 (1,0)
1	А-430-1	9,4 (1,1)
1	93-Г-1	9,1 (1,0)

Примечание. *, ** – см. примечание к табл. 7.

Таблица 9. Оценки температуры (°C) и давления (кбар), статистические параметры этих оценок по программе TERMOCALC в гранат-пироксеновых кристаллосланцах сутамского метаморфического комплекса.

№ блока	№ обр.	Оценка P	sd (P)	Оценка T	sd (T)	cor	fit
2	18669/3	7,9	0,7	900	92	0,274	1,08
2	18659/3	6,4	1,7	786	148	0,679	1,14
2	37-Б	6,4	1,5	739	126	0,727	0,51
2	412-6	7,3	3,0	942	266	0,701	1,67
1	А-420-5	8,4	1,8	850	150	0,730	0,58
1	А-424	8,9	2,0	864	173	0,858	0,67

тальный, а TERMOCALC – термодинамический), то величина 1 кбар является абсолютной оценкой точности оценки давления метаморфизма. Из таблицы 8 ясно видно различие двух блоков по величине давления.

Представление о максимальных величинах давления сутамского метаморфизма в каждом блоке можно получить на основе таблицы 8. В этой таблице по программе TERMOCALC задавалась темпера-

тура в 900°C и для каждого образца считалась оценка давления (табл.8). Дело в том, что эффекты регрессивной перекристаллизации, как правило, сказываются на занижении температуры Fe-Mg минеральных равновесий, что автоматически приводит к занижению оценок давления. Если же на основе каких-либо соображений принять наиболее оптимальную температуру метаморфизма, то можно в какой-то мере получить представление о максимальных оценках давления. При таком подходе мы вновь видим четкое различие по глубинности двух блоков (табл.8), причем средняя оценка максимального давления в первом блоке составила 9,1 кбар, а во втором – 7,6 кбар. Оценка максимального давления сутамского метаморфизма оказалась чрезвычайно близкой к наиболее высокой оценке давления (9,2 кбар, обр. Sut-61), приведенной в работе [25].

Наконец, мы можем в отдельных образцах одновременно определить температуру и давление по программе TERMOCALC. В нашем распоряжении оказалось 6 таких образцов: два образца из первого блока и четыре – из второго. Как видно, вновь оценка давления в первом блоке оказывается выше, чем во втором (табл. 9). Изменение состава флюида для данных равновесий почти не сказывается на величине оценок T и P.

Следовательно, ответ на два вышепоставленных вопроса следующий:

1) можно уверенно говорить о неоднородности условий сутамского метаморфизма по давлению, причем метапороды верхнего течения р. Сутам менее глубинны, (7–8 кбар), чем метапороды среднего течения р. Сутам (ниже устья р. Гидат) (8–9 кбар);

2) максимальные оценки давления сутамского метаморфизма в наиболее высокобарном блоке не могут превышать величины 9,5 кбар.

Важно подчеркнуть, что оба вывода независимо подтверждаются на основе расчетов, проведен-

ных на других образцах и по другим методикам [2, 25], поэтому можно говорить об их высокой достоверности.

Породы амфиболитовой фации Джугджуро-Станового блока Алдано-Станового щита

Джугджуро-Становой блок представляет собой юго-восточную часть Алдано-Станового щита и граничит на севере с Олекминским, Алданским и Батомгским блоками, на юго-западе – с Селенго-Становым блоком, на юго-востоке – с Аяно-Шевлинским прикратонным прогибом Алданской плиты, и на юге – с Монголо-Охотской складчатой системой.

Метаморфические породы амфиболитовой фации слагают значительную часть Джугджуро-Станового блока и первоначально были объединены в единый становой комплекс [15]. Позднее Л.П.Карсаковым [7] из состава станового комплекса были выделены зейский и гиллойский комплексы.

Наиболее древними (AR_1 , алданий) из описываемых пород, по Л.П. Карсакову [7], считаются образования зейского комплекса, объединяющего зейскую, удско-майскую, кирано-лавлинскую серии, а также чильчинскую свиту. Вышеперечисленные серии слагают соответственно Сивакано-Купуринский, Удско-Майский и Кирано-Лавлинский блоки, а чильчинская свита – Мульмута-Нюкжинский блок. 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 – цоизит-клинопироксеновыми кристаллическими сланцами, биотит-клинопироксен-амфиболитовыми и цоизит-биотитовыми гнейсами. Встречаются прослои и линзы кварцитов, мраморов и кальцифиров. Отличительной чертой данного комплекса является частое присутствие в породах эпидота и цоизита.

Более молодые (AR_1 , становий) породы станового комплекса в пределах Джугджуро-Станового блока представлены купуринской, иликанской, усть-гиллойской сериями и мульмугинской свитой, слагающими одноименные блоки (зоны). Некоторые авторы [4] включают Усть-Гиллойский (Алмазаро-Гиллойский) блок в состав Селенго-Станового блока. Породы станового комплекса имеют достаточно однообразный состав. В основном это биотитовые, роговообманковые, биотит-роговообманковые, роговообманково-биотитовые кристаллические сланцы и гнейсы, гранат-биотитовые и двуслюдяные гнейсы, амфиболиты. Породы часто гранатсодержащие, иногда с кианитом и силлиманитом.

К верхнеархейским (AR_2 , сахаборий) на рассматриваемой территории относят метаморфические породы гиллойского комплекса, выполняющие, по Л.П. Карсакову [8], “троговые приразломные структуры вдоль зон шовных дислокаций и крупных зон разломов”. Стратиграфия гиллойского комплекса изучена слабо. Слагающие его породы были метаморфизованы в условиях от эпидот-амфиболитовой до амфиболитовой фаций.

Оценке условий метаморфизма пород амфиболитовой фации Джугджуро-Станового блока посвящено большое количество работ [1, 9, 12 и др.]. Температура метаморфизма этих пород варьирует в пределах 550–680°C и большей частью превышает 600°C. Что касается давления, то оно для пород станового комплекса равно 5–8 кбар, а для пород зейского комплекса, по оценкам работы [9], давление достигало 8–10 кбар. Уже на основании этих оценок можно думать, что образования амфиболитовой фации Джугджуро-Станового блока не уступают, по меньшей мере, по условиям глубинности суламским гранулитам. Но чтобы доказать это положение, необходимо провести более строгие расчеты оценок P и T, чем это сделано в работе [9].

Таблица 10. Минеральные парагенезисы в метаморфических породах Джугджуро-Станового блока .

№ образца	Минеральный парагенезис	Место отбора
Становой комплекс		
Г-28	Gr+Bi+Amph+Pl+Q	р. Гиллой
Г-55	Gr+Bi+St+Ky+Pl+Q	р. Гиллой, кл. Раковский
Г-55ж	Gr+Bi+St+Ky+Pl+Q	р. Гиллой, кл. Раковский
Г-523а	Gr+Amph+Pl+Q	р. Манахта
560д	Gr+Bi+Mu+Ky+Sill+Pl+Q	р. Нерунда
Зейский комплекс		
59б	Gr+Amph+Ep+Pl+Q	р. Мая, выше р. Ванга
64	Gr+Amph+Mu+Pl+Q	р. Мая, р. Ванга
86е	Gr+Bi+Ep+Pl+Q	р. Мая, р. Салга
661а	Gr+Cpx+Pl+Q	р. Купури, ниже р. Теллак
719а	Gr+Cpx+Pl+Cc+Gph+Q	р. Зея, ниже р. Чункуй
2132д	Gr+Bi+Amph+Ep+Mu+Pl+Q	р. Мая, р. Салга
2157г	Gr+Cpx+Zo+Pl+Q	р. Лавля

Примечание. Gr – гранат, Amph – амфибол, Bi – биотит, Mu – мусковит, St – ставролит, Ky – кианит, Sill – силлиманит, Ep – эпидот, Zo – цоизит, Cpx – клинопироксен, Cc – кальцит, Pl – плагиоклаз, Q – кварц.

Для исследования условий метаморфизма зейского и станового комплексов Джугджуро-Станового блока с помощью программы TERMOCALC нами были взяты следующие минеральные парагенезисы из работы [9], (табл. 10).

Из таблицы 10 видно, что в породах станового и зейского комплексов не существует сквозного одинакового минерального парагенезиса, пригодного для оценки давления. Поэтому, минимальный подход программы TERMOCALC логически более оправдан для сравнительной оценки условий образования этих комплексов между собой и, естественно, для сопоставления по глубинности с сугамскими гранулитами.

Результаты расчетов P и T метаморфизма пород станового комплекса по программе TERMOCALC представлены в табл. 11. К сожалению, для некоторых образцов одновременное определение температуры и давления не представляется возможным, поэтому давление в них оценивалось при температуре, принятой из других соображений.

Из таблицы 11 видно, что температура метаморфизма пород станового комплекса была не ниже 550 °C. Исключение составляет лишь оценка температуры для ядер прогрессивно зонального граната и зонального плагиоклаза обр. Г-55ж(с) (табл. 11). Литостатическое давление пород станового комплекса, изменяется в диапазоне 7–8 кбар, если исключить обр. г-523а.

Результаты оценки P-T-параметров метаморфизма зейского комплекса приведены в таблицах 5, 6 и 12. В большинстве случаев по программе TERMOCALC не удается одновременно определить оценки P и T в этих образцах. Лишь для образца 2132д удалось получить оценку средних P = 9,1 кбар и T = 563 °C при X_{H₂O} = 0.5. Для остальных образцов давления были рассчитаны для вероятных температур метаморфизма в 550, 600 и 650°C (табл. 12).

Несмотря на то, что программа TERMOCALC и ни один из существующих минералогических тер-

Таблица 11. Оценки P и T образования пород станового комплекса.

№	av P	av T	T по [9]	P(T)
Г-28			635,630	7.7(630)
Г-55	7.4	550	537,550	
Г-55ж(г)	7	568	590	
Г-55ж(с)	8.1	532	466,450	7.9(460)
Г-523а				5.9(550)
560д	7.9	694	678,650	

Примечание. av P и av T – средние давление и температура, определяемые программой без указания одного из этих параметров пользователем.

Таблица 12. Оценка давления (кбар) метаморфизма пород зейского комплекса при температурах 550, 600 и 650°C.

№	P при T=550°C	P при T=600°C	P при T=650°C
596	7.7	9.1	10.5
64	7.3	9.2	11
661а	8.4	9.2	10.1
719а	8.4	9.2	10

мометров не позволяют корректно и достоверно определить температуру метаморфизма для всех рассмотренных образцов пород зейского комплекса, очевидно, что она не выходила за пределы 550–680°C [9]. Таким образом, наиболее вероятный диапазон давления для пород зейского комплекса составляет 7.3–11.5 кбар. (табл. 5, 6, 12). В работе [9] приводится температура для 9 образцов из пород зейского комплекса, и только в 3 из них температура ниже 600°C. Если принять как факт, что температура метаморфизма зейского комплекса не ниже 600°C, то мы получаем почти одинаковую оценку давления во всех образцах – 9.1–9.2 кбар.

Геодинамические взаимоотношения метаморфических пород Алдано-Станового щита

Подчеркнем некоторые хорошо установленные положения, важные для решения поставленной проблемы.

1. В настоящее время твердо доказана протерозойская перекристаллизация пород Алданского блока, поскольку громадные объемы чарнокитов, распространенных в его пределах, имеют протерозойский возраст (рис. 1). В связи с этой широко проявленной перекристаллизацией осуществлялся также гра-

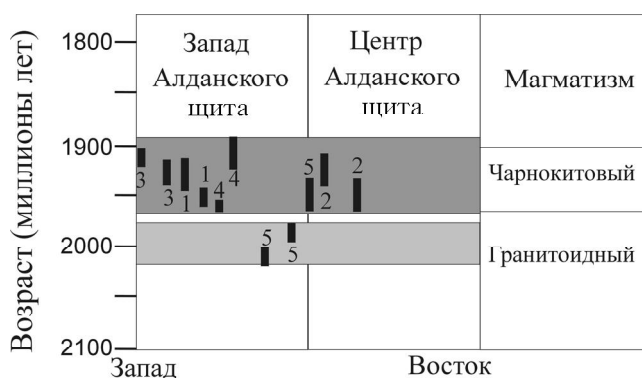


Рис. 1. Геохронология раннепротерозойского магматизма в пределах Алданского блока, согласно [18].

Источники: 1 – [24]; 2 – [29]; 3 – Chamberlain, неопубликованные данные; 4 – [22]; 5 – [23].



Рис. 2. Возраст протолитов (незакрашенные прямоугольники) и возраст метаморфизма (закрашенные прямоугольники) метаморфических комплексов Алдано-Станового щита по опубликованным данным (см. список литературы).

нулитовый метаморфизм протерозойского возраста по меньшей мере в бассейне р. Алдан [18].

2. Метаморфизм пород амфиболитовой фации Джугджуро-Станового блока происходил примерно в то же время, что и широко проявленная перекристаллизация пород Алданского блока (рис. 2).

3. Глыбы или блоки пород гранулитовой фации, распространенные внутри Джугджуро-Станового блока, близки по возрасту (рис. 2) и условиям образования гранулитам юга Алданского блока [1, 6]. Как правило, указанные глыбы или гранулитовые блоки имеют с вмещающими породами амфиболитовой фации Джугджуро-Станового блока тектонические контакты.

4. Метаморфизм амфиболитовой фации пород Джугджуро-Станового блока, по крайней мере в отдельных районах, мог превышать по величине литостатического давления даже высокobarные гранулиты юга Алданского блока.

5. Определенно нельзя полагать, что гранулиты сутамского комплекса вверх по вертикальному разрезу постепенно сменяются породами амфиболитовой фации Джугджуро-Станового блока. Это заключение ясно вытекает из четвертого положения.

Поэтому в рамках сформулированных пяти заключений, можно предложить следующую геодинамическую модель взаимоотношения Джугджуро-Станового и Алданского блоков.

Протерозойская перекристаллизация Алданского блока связана с метаморфизмом Джугджуро-Станового блока и обусловлена субдукцией или поддвигом Становой плиты под Алданский блок.

Погружение плиты происходило главным образом с юга на север, так что самые глубоко погруженные зоны плиты приходятся на ее северные части. В

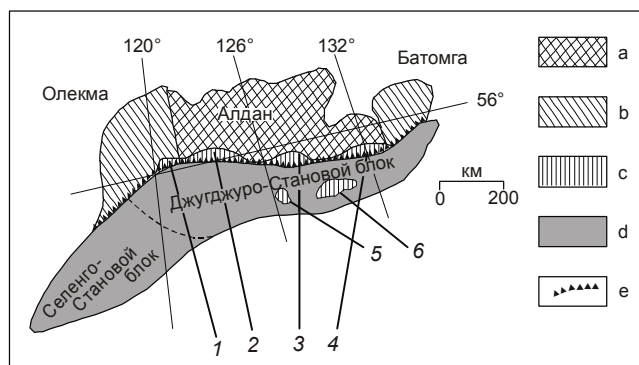


Рис. 3. Схема взаимоотношения пород Алданского и Джугджуро-Станового блоков Алдано-Станового щита.

a – гранулитовые комплексы Алданского блока, испытавшие интенсивную перекристаллизацию в протерозое; b – Олекминский и Батомгский гранитно-зеленокаменные блоки; c – гранулитовые комплексы повышенных давлений и температур, расположенные в пределах блоков: 1 – Курультинского, 2 – Зверевского, 3 – Сутамского, 4 – Джугджурского, 5 – Сивакано-Токского, 6 – Чогарского; d – породы Джугджуро-Станового и Селенго-Станового блоков (Становой мегаблок), метаморфизованные в условиях амфиболитовой фации; e – граница поддвига пород Джугджуро-Станового блока под Алданский блок в современном эрозионном срезе.

этих наиболее погруженных зонах плиты, достигающих уровня мантии, происходило плавление плиты, что приводило к появлению магматических расплавов, поднимающихся вверх и внедряющихся в древнюю кору Алданского блока архейского возраста, вызывая ее гранулитовый метаморфизм или переплавление. В бассейне р. Алдан хорошо задокументирован протерозойский чарнокитовый магматизм и гранулитовый метаморфизм этого же возраста [18]. Собственно метаморфизм амфиболитовой фации Становой плиты осуществлялся, однако, только в ее верхних горизонтах, географически южнее современного положения Алданского блока (рис. 3), но он проходил под литостатической нагрузкой ранее образованной гранулитовой коры, что и привело к повышенным оценкам литостатического давления в породах Становой плиты. Перекристаллизация вышеуказанных гранулитов в этих зонах могла осуществляться только в ограниченных масштабах, где происходила инфильтрация флюидов, поступающих из подстилающих гранулиты становых пород или мантии. Повторная перекристаллизация сутамских гранулитов также хорошо документируется [16].

Таким образом, Джугджуро-Становый блок может представлять собой древнюю зону субдукции. С этой точки зрения глыбы гранулитовых пород внутри Джугджуро-Станового блока являются не его фундаментом, а наоборот – остатками бывшей ар-

хейской кровли, находившейся над погружающейся Становой плитой во время ее метаморфизма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрена методика расчета Р-Т оценок минеральных равновесий на основе программы TERMOCALC.

2. Проведена сравнительная оценка глубинности формирования метаморфических пород, распространенных по югу Алданского блока (сутамский комплекс) и в пределах Джугджуро-Станового блока и показано, что метапороды последнего, по меньшей мере в отдельных районах, могут превышать по величине литостатического давления уровень глубинности гранулитов юга Алданского блока.

3. На основе петрологических и геохронологических данных предложена геодинамическая модель взаимоотношения пород Алдано-Станового щита, согласно которой метаморфизм Джугджуро-Станового блока в протерозое тесно связан с протерозойской перекристаллизацией Алданского блока и происходил в условиях субдукции Становой плиты под Алданский блок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ – проекты № 99-05-64487 и №01-05-06075. Авторы выражают признательность Л.П. Карсакову за ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

- Авченко О.В. Минеральные равновесия в метаморфических горных породах и проблемы геотермобарометрии. М.: Наука, 1990. 181 с.
- 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.
- Бибикова Е.В., Шульдинер В.И., Грачева Т.В. и др. Изотопный возраст гранулитов на западе Становой области // Докл. АН СССР. 1984. Т. 275, № 6. С. 1471–1474.
- Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий. 1:2 500 000. Объясн. зап. СПб., 1999. 135 с.
- Графчиков А.А., Фонарев В.И. Гранат-ортопироксен-плагиоклаз-кварцевый геобарометр (экспериментальная калибровка) // Очерки физико-химической петрологии. М.: Наука, 1991. Вып. XVI. С. 199–255.
- Карсаков Л.П. Глубинные гранулиты. М.: Наука, 1978. 151 с.
- 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.
- Карсаков Л.П. Раннедокембрийские комплексы в структуре Восточной Азии: Дис. в виде науч. докл. д-ра геол.-минер. наук. Хабаровск, 1995. 88 с.
- Козырева И.В., Авченко О.В., Мишкин М.А. Глубинный метаморфизм позднеархейских вулканогенных поясов. М.: Наука, 1985. 165 с.
- Лаврентьева И.В., Перчук Л.Л. Фазовое соответствие в системе биотит-гранат: экспериментальные данные // Докл. АН СССР, 1981. Т. 260, № 3. С. 731–734.
- Маракушев А.А. Проблемы минеральных фаций метаморфических и метасоматических горных пород. М.: Наука, 1968. 200 с.
- Мишкин М.А., Авченко О.В. К петрологии метаморфических пород Становой складчатой области // Докембрийские комплексы зоны БАМ. Владивосток, 1979. С. 91–111.
- Мишкин М.А., Масловская М.Н., Лаврик С.Н., Вовна Г.М. Геохимия и Rb-Sr изотопия архейской метабазит-эндербитовой формации юга Алданского щита (Сутамский блок) // Геохимия. 1999. № 9. С. 1–10.
- Мишкин М.А., Карпенко С.Ф., Лаврик С.Н., Вовна Г.М., Октябрьский Р.А. Sm-Nd изотопная систематика метабазитов архейского сутамского гранулитового комплекса (юг Алданского щита) // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2000. Т. 8, № 2. С. 3–8.
- 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.
- 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.
- Ferry J.M. P, T, f_{CO_2} and f_{H_2O} during metamorphism of calcareous sediments in the Waterville – Vassalboro area, South-Central Maine // Contrib. Miner. and Petrol. 1976. V. 57, N 2. P. 119–143.
- 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.
- Ghent E.D. Plagioclase-garnet- Al_2SiO_5 -quartz: a potential geobarometer-geothermometer // Amer. Miner. 1976. V. 61, N. 7/8. P. 710–714.
- Guiraud M, Holland T.J.B., and Powell R. Calculated mineral equilibria in the greenschist-blueschist-eclogite facies in Na_2O -FeO-MgO- Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O . Methods, results and geological applications // Contrib. Mineral. Petrol. 1990. V. 104, N. 1. P. 85–98.
- Holland T.J.B., and Powell R. An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations. II. Data and results // Journal of Metamorphic Geology. 1985. 3. 343–370.
- Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Morozova I.M., Bogomolov E.S., Belyatskii B.V., Berezhnaya N.G. Early-Proterozoic granitoids of the northwestern Aldan shield // Russian J. Geol. Geophys. 1993. 34. P. 11–17.
- Kotov A.B., Korach V.P., Sal'nikova E.B., Glebovitskii V.A., Yakovleva S.Z., Berezhnaya N.G., Myskova T.A. Continental crust age and formation stages in the central part of the Aldan granulite-gneiss terrain: U-Pb and Sm-Nd isotopic data on granitoids // Doklady Akademii Nauk RAN. 1995. 3. P. 99–111.

24. 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. 54. P. 195–210.
25. 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. 3. P. 265–310.
26. Powell R., and Holland T.J.B. An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations. III. Application methods, worked examples and a computer program // *Journal of Metamorphic Geology.* 1988. 6. P. 173–204.
27. Powell R., Holland T.J.B. Optimal geothermometry and geobarometry // *Amer. Mineral.* 1994. V.79, N 1-2. P. 120–134.
28. Raheim A., Green D.H.. Experimental determination of the temperature and pressure dependence of the Fe-Mg partition coefficient for coexisting garnet and clinopyroxene // *Contrib. Miner. and Petrol.* 1974. V. 48, N 3. P. 179–203.
29. Velikoslavinsky S.D., Tolmacheva E.V., Dook V.L. Milkevich R.I., Rudnik V.A. Geochemical mapping of basic complexes in the early Precambrian Aldan-Stanovoy Shield of Siberia // *Precambrian Res.* 1993. 62. P. 507–525.

Поступила в редакцию 4 февраля 2001 г.

Рекомендована к печати Л.П. Карсаковым

I.A. Alexandrov, O.V. Avchenko

Comparative thermobarometry of metamorphic complexes, and the geodynamic model of the relationships between the Aldan and the Dzhugdzhur-Stanovoy block (Aldan-Stanovoy shield)

The technique of pressure and temperature estimations of mineral assemblages on the basis of the TERMOCALC program is described. PT-conditions of formation of the Sutam complex (Aldan block) granulites and metamorphic rocks of the Zeiskiy and Stanovoy complexes (amphibolite facies, Dzhugdzhur-Stanovoy block) were determined. It is established that the depth of formation of the metamorphic rocks of the Dzhugdzhur-Stanovoy block (amphibolite facies) does not concede, and sometimes exceeds the depth level of granulites of the southern part of the Aldan block. On this basis supplemented with modern isotope data, a new geodynamic model of the relationships between the Aldan and the Dzhugdzhur-Stanovoy block (Aldan-Stanovoy shield) is offered. According to this model, metamorphic events of the Dzhugdzhur-Stanovoy block are closely connected with Proterozoic recrystallization of the Aldan block and occurred under the conditions of subduction of the Stanovoy plate under the Aldan block.