

Ю. А. ДОЛГОВ, С. В. МЕЛЬГУНОВ, Н. А. ШУГУРОВА

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ  
МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД ЮЖНО-ЧУЙСКОГО ХРЕБТА  
(ЮГО-ВОСТОЧНЫЙ АЛТАЙ)**

*(Представлено академиком В. С. Соболевым 10 VI 1969)*

Зона метаморфических пород Южно-Чуйского хребта расположена в осевой части шовной антиклинальной структуры, образовавшейся вблизи мобильного Чарышско-Теректинского глубинного разлома, и представляет собой зону смятия, которая на современном эрозионном срезе не выходит за пределы мощности флишовой песчано-сланцевой толщи горно-алтайской серии. Породы серии на территории Алтая повсеместно испытали региональный метаморфизм фации зеленых сланцев. По форме зона смятия представляет собой линейную псевдосинклинальную структуру длиной свыше 100 км и шириной 10—14 км. В ее пределах, и особенно сильно в замковой части, отложения горно-алтайской серии интенсивно дислоцированы.

В результате проявления локального динамотермального метаморфизма за счет пород серии возник комплекс кристаллических сланцев и гнейсов, отвечающий амфиболитовой фации. В центральной части зоны смятия в наиболее дислоцированных участках отмечаются проявления ультраметаморфизма: фельдшпатизация гнейсов, проявление мигматитов, с которыми тесно связано образование автохтонных гранитоидов.

Гнейсы центральной части зоны характеризуются следующими минеральными ассоциациями, отражающими различные степени прогрессивного метаморфизма амфиболитовой фации: 1) кварц — биотит — плагиоклаз — ильменит; 2) кварц — биотит — кордиерит — мусковит — плагиоклаз — ильменит (часто с гранатом); 3) кварц — андалузит — силиманит — мусковит — биотит — плагиоклаз (иногда с кордиеритом и ильменитом); 4) кварц — дистен — мусковит (иногда с андалузитом и силиманитом). Наиболее широко распространены две первые ассоциации. Определение содержания железистого компонента в гранате и кордиерите второй ассоциации позволили приблизительно оценить давления метаморфизма при формировании пород амфиболитовой фации, содержащих гранат и кордиерит (6—7 кбар).

С проявлениями ультраметаморфизма в частности с процессом фельдшпатизации гнейсов, генетически связано образование пегматитов. В ряде мест наблюдаются переходы от незначительных по размерам сегрегаций кварца и полевого шпата к более крупным пегматоидным обособлениям — гнездам, линзам и жилам, согласно и несогласно залегающим среди гнейсов. Эти обособления, как правило, окружены каймами перекристаллизованного биотита и ильменита и часто содержат реликты вмещающих пород. По минеральному составу и структуре пегматоидные обособления разделяются на две группы. Первая представлена типичными пегматитами мигматитов с четко выраженным зональным строением. Они сложены блоковым кварцем и полевым шпатом (олигоклазом № 15—20) с подчиненным количеством крупночешуйчатого мусковита, реже биотита. В центральных частях тел отмечаются зоны и линзовидные участки, сложенные чистым кварцем, к которым иногда приурочен дистен. В краевых

зонах спорадически встречаются гнезда и отдельные кристаллы андалузита и кордиерита. Вторая группа представлена разностями преимущественно кварцевого состава. По существу, это кварцевые жилы и линзы, содержащие в приальбандовых частях крупнокристаллический андалузит, кордиерит и полевой шпат, нередко гнезда силлиманита и дистена. Дистен также образует мономинеральные или совместные с кварцем жилки, секущие гнейсы (1).

Таблица 1

Число включений	Т-ра гетерогенизации, °С	Т-ра Гомогенизации, °С	Среднее значение, °С	Удельный объем	Давление, бар
4	-15,4	-9,1	-12,3	1,06	5400
60	-23,8	-18,0	-20,9	0,967	6200
7	-31,2	-21,6	-26,4	0,944	6700
9	-33,6	-28,2	-30,9	0,928	7300

С целью установления термодинамических параметров и состава растворов, участвующих в процессе метаморфизма, было проведено всестороннее изучение включений в кварце, андалузите, дистене из пегматоидных обособлений. В силлиманите и кордиерите включения, пригодные для исследования, обнаружены не были. Просмотрено и изучено 378 пла-

Таблица 2

Минерал	Число включений	Пределы т-ры гетерогенизации, °С	Удельный объем	Давление, бар
Кварц	14	-149	2,194	2400
	16	-160	1,672	4750
Андалузит	10	-149	2,194	2400
	13	-164	1,597	5650
Дистен	2	Ниже -190	1,280	8300

стинок. Наиболее богат включениями кварц. По агрегатному состоянию можно выделить следующие типы включений в кварце: 1) однофазовые включения уплотненных жидкостей ( $Ж_1$  и  $Ж_2$ ); 2) многофазовые включения, содержащие жидкость, газ, одну или несколько твердых фаз ( $Ж - Г - T_n$ ); 3) газовой-жидкие включения ( $Ж - Г$ ). В дистене и андалузите обнаружены только жидкие включения.

В целом по агрегатному состоянию включения разделяются на две четкие группы: уплотненные жидкости и оживленные газы, малоплотные включения. Для определения плотности и состава включений первой группы применялись криометрия и анализ газов из этих включений, для второй — обычная термометрия методом гомогенизации и анализ газа.

Кварц содержит множество внутризерновых включений первичного эндогенного (доседиментационного) происхождения, трансформированных в метаморфические. Между зернами кварца наблюдаются также включения, которые могут иметь реликтовое происхождение или связаны с перекристаллизацией. И те, и другие являются включениями уплотненных жидкостей. При охлаждении до  $-190^\circ$  они обнаружили разные свойства. Большинство одножидких включений содержали в качестве растворителя жидкую углекислоту, насыщенную большим количеством газов. Углекислота диагностирована по тройной точке  $-56,6^\circ$  во всех случаях с ошибкой, не превышающей  $\pm 2\%$ . В табл. 1 приведены результаты гомогенизации, гетерогенизации и плотности углекислых включений,

определенные способом, описанным ранее (2). Неизвестным свойством углекислоты, выявленным в ходе исследования, является ее способность растворять большие объемы газов (до 60%). Однако содержание в весовых процентах растворенных газов гораздо меньше. На способность углекислоты растворять водносолевые растворы в количествах до 50% указывалось ранее (2).

Жидкостные включения (рис. 1, см. вклейку к стр. 862) в андалузите и дистене очень редки, и работа с ними затруднена из-за их малых размеров (10—40μ). Исследование дало удивительные результаты (табл. 2). При

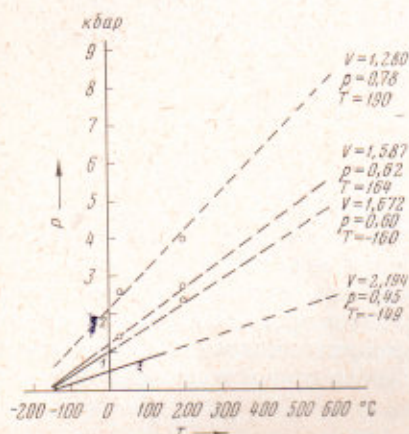


Рис. 2. *PT*-диаграмма для азота до 1000° и 1000 атм; построена по табличным данным (2, 4) с контрольными точками по экспериментальным данным (8, 9). Изохора 1,280 — для включений в дистене (—190°), 1,587—2,194 — в андалузите (от —149 до —164°) и кварце (от —149 до —160°)

охлаждении они гетерогенизировались при очень низких температурах (от —143 до —168°) и показали тем самым, что состоит из низкокипящих сжиженных газов. Гетерогенизация этих включений происходит при температурах ниже критической температуры азота (—147°) и выше точки его плавления (—210°) на кривой двухфазового равновесия. Азот жидкоподобен и имеет плотность 0,45—0,78. Анализ газов из этих включений показал содержание 100% азота и редких газов (табл. 3). Воздух и CO<sub>2</sub>, имеющие линии двухфазового равновесия, близкие к азоту, исключаются данными газового анализа (3). Возможно неопределенное содержание аргона и иных более низкокипящих благородных газов (He, Ne). Однако проверка их присутствия на азотной охлаждающей установке невозможна.

Между включениями углекислыми и азотными, по-видимому, существует ряд переходов. В одном криометрическом анализе была получена температура гетерогенизации (—143°) выше критической

температуры азота, что указывает на примесь какого-то иного газа. Анализом (табл. 3, ан. № 3) установлено, что действительно, эта газовая фаза кроме 94,7% азота и редких газов, содержит также 5,3% углекислоты. Углекислые включения (ан. №№ 1 и 2), в свою очередь, содержат заметные количества азота и иных газов.

На основании теоретических расчетов и экспериментальных данных (6, 7) тройная точка дистен — силлиманит — андалузит находится в области, близкой к 600°; по другим данным, эта точка отвечает более низ-

Таблица 3

Минерал	№ анализа	Т-ра гетерогениз., °C	Диаметр включения, мм	V <sub>пузы</sub> / V <sub>вкл</sub>	Концентрация, об. %					
					H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , NH <sub>3</sub> , HCl, HF	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> + р. г.
Кварц	1	—24	0,155	860	49,2	40,8	0,0	6,2	3,8	
	2	—33,5	0,12	729	19,7	57,2	0,0	3,5	5,9	14,6
	3	—143,5	0,071	970	0,0	5,32	0,0	0,0	0,0	94,68
	4	—158	0,037	1900	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
Андалузит	1	—156	0,043	732	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
	2	—157	0,029	843	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
	3	—159	0,045	2010	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
	4	—164,5	0,033	2600	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100
Дистен	1	—190	0,019	2900	0,0	0,0	9,0	0,0	0,0	100

ким температурам (5). На *PTV*-диаграммах для азота и углекислоты бралась изотерма 600°. Давления, соответствующие метаморфизму, находятся в пределах от 2 до 8 кбар, что не противоречит экспериментальным данным и теоретическим представлениям (3, 4).

Давления по азоту определялись на основании тех же принципов, что и для CO<sub>2</sub>, но с более далекой экстраполяцией изохор на диаграмме (рис. 2). Результаты, приведенные на графике, показывают, что наивысшей плотностью азота во включениях обладает дистен. Кварц и андалу-

Т а б л и ц а

Характер включений	Число включений	Т-ра гомогенизации, °С		
		T <sub>Г</sub>	T <sub>T'</sub>	T <sub>T''</sub>
Ж + Г	20	150—320		
Ж + Г + Т'	8	120—250	200—350	
Ж + Г + Т''	18	140—250		220—420
Ж + Г + Т' + Т''	3	250—300	30—320	280—400

зит образовались в условиях близких давлений, и их азотные включения близки по плотности. Плотность углекислых включений в кварце соответствует давлениям, которые найдены по азотным включениям. Дистен — минерал самых высоких давлений (см. табл. 2).

Водносолевые включения относятся к термодинамическим условиям фации зеленых сланцев и характеризуются малой плотностью: содержат жидкость с газовым пузырьком. Для включений типа Ж — Г определены концентрации солей по NaCl-эквиваленту в пределах 3—20%. Температуры полной гомогенизации заключены в пределах 120—400° (табл. 4).

Таким образом, изменение состава растворов в процессе метаморфизма, по данным анализа и термометрии, представляется в следующем виде.

1. Уплотненные жидкости и оживленные газы (азотные, углекислоазотные, азотно-углекислые и углекислые растворы) характеризуют условия высоких ступеней метаморфизма.

2. Малоплотные включения (высококонцентрированные водносолевые растворы без заметного участия углекислоты) характеризуют диафорез.

В заключение необходимо отметить особый характер метаморфизма пород Южно-Чуйской зоны. Он не имеет ничего общего с региональным, так как реставрация геологического разреза дает мощности, не превышающие 5,5—6,5 км, которые не могли создать высоких натрузочных давлений. Это — полосовый метаморфизм, созданный боковыми давлениями (10, 11) в зоне смятия, связанной с глубинным Чарышско-Теректинским разломом.

Институт геологии и геофизики  
Сибирского отделения Академии наук СССР  
Новосибирск

Поступило  
3 VI 1969

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> А. С. Митропольский, Н. А. Кулик, С. В. Мельгунов, Сборн. Матер. по генетической и экспериментальной минералогии, Новосибирск, 5, 1967, стр. 252.  
<sup>2</sup> Ю. А. Долгов, В. М. Макагон, В. С. Соболев, ДАН, 175, № 2, 444 (1967).  
<sup>3</sup> Справочник по разделению газовых смесей, М., 1963. <sup>4</sup> Теплофизические свойства воздуха и его компонентов, М., 1968. <sup>5</sup> В. А. Пугин, Н. И. Хитаров, Геохимия, 1968, стр. 157. <sup>6</sup> Н. Л. Добрецов и др., Фации метаморфизма, 1, 1969. <sup>7</sup> Н. Л. Добрецов, Геология и геофизика, № 3 (1969). <sup>8</sup> J. Bassett, R. Dupinau, C. R., 191, 1295 (1930). <sup>9</sup> M. Benedict, J. Am. Chem. Soc., 59, 2224, 2233 (1937).  
<sup>10</sup> В. С. Соболев, В сборн. Физико-химические проблемы формирования горных пород и руд, М., 1961. <sup>11</sup> Ф. Н. Шахов, Матер. по геологии Зап.-Сиб. края, Томск, 1933.

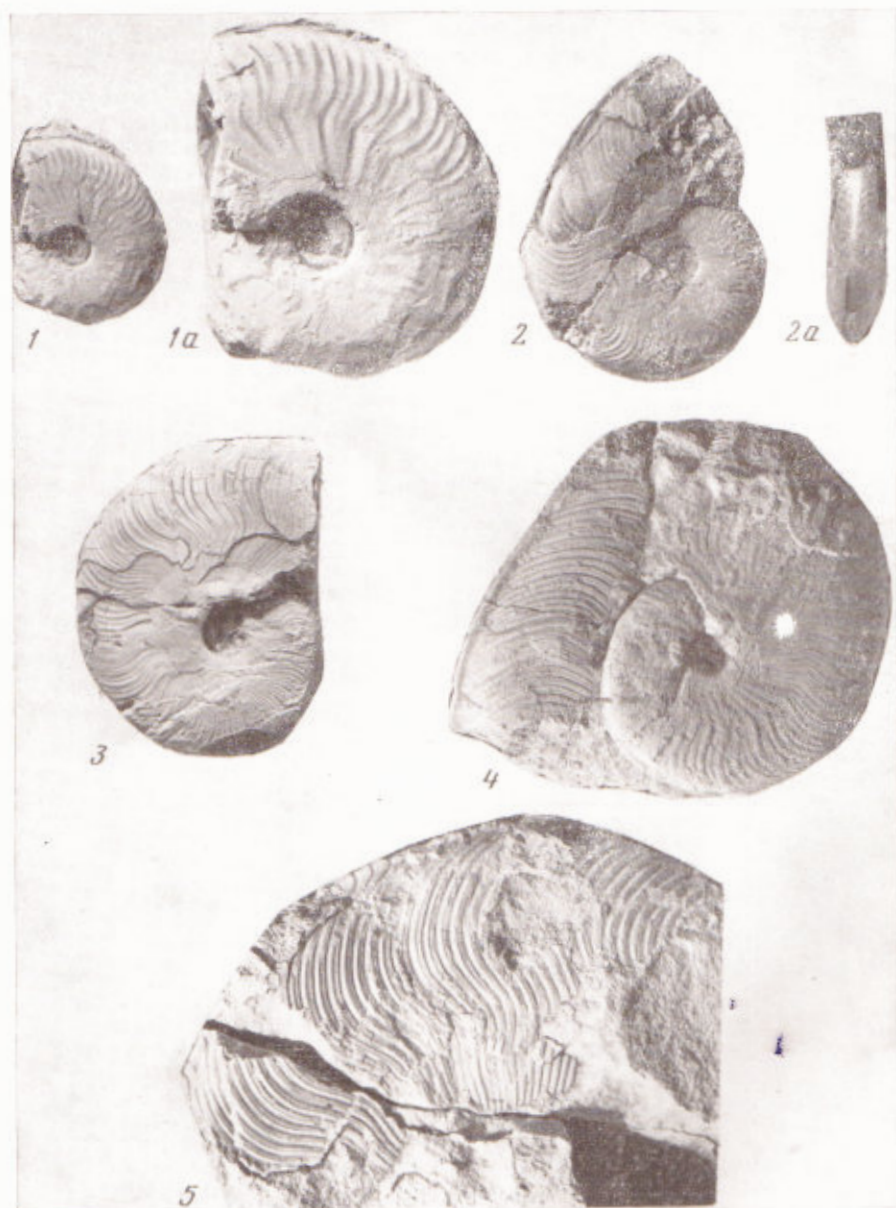


Рис. 1. *Kolymoceras viluiense* Krimh. Средний тоар, зона *Dactylioceras commune*, Северо-Восток СССР, Омолонский массив (2 — вид сбоку, 2а — вид с ventральной стороны). Все фото, кроме 1а (2×), нат. вел

К статье Ю. А. Долгова, С. В. Мельгунова и Н. А. Шугуровой, стр. 892



Рис. 1. Гетерогенизация включений с уплотненными жидкостями. а, б — углекислые включения в кварце,  $T_{\text{гом}} = -25^{\circ}$ ; в, г — азотные включения в андалузите,  $T_{\text{гет}} = -160^{\circ}$