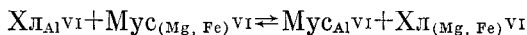


Н. В. КОТОВ

МУСКОВИТ-ХЛОРИТОВЫЙ ПАЛЕОТЕРМОМЕТР

(Представлено академиком Д. С. Коржинским 25 VII 1974)

К настоящему времени хорошо известно, что в относительно бедных калием метapelитах совместно образующиеся Мус* и Хл переменного состава часто являются главными породообразующими минералами вплоть до $T \sim 450-500^\circ \text{C}$, когда в породах появляются Хл-ди, а затем Гр и Ст (^(1, 2) и др.). Эмпирические данные о составах этих минералов свидетельствуют о том, что по мере возрастания степени изменения пород от ката- и метатексиса до высокотемпературных субфаций фации зеленых сланцев октаэдрические позиции структуры Мус все более обогащаются Al^{VI} , а 14 Å-триоктаэдрические Хл — обогащаются Mg (⁽³⁾ и др.). В связи с этим представлялось целесообразным изучить распределение Al^{VI} и $(\text{Mg}, \text{Fe})^{\text{VI}}$ в структурах этих сосуществующих минеральных пар и попытаться использовать обменную реакцию



с целью создания мусковит-хлоритового палеотермометра, специально предназначенного для характеристики T формирования пород зон регионального эпигенеза — начального метаморфизма. Коэффициент распределения Al^{VI} для этой реакции рассчитывали по уравнению:

$$K_D^{\text{Al}^{\text{VI}}} = \frac{X_{\text{Al}}^{\text{Мус}} \cdot (1 - X_{\text{Al}}^{\text{Хл}})}{(1 - X_{\text{Al}}^{\text{Мус}}) \cdot X_{\text{Al}}^{\text{Хл}}}, \text{ где } X_{\text{Al}} = \frac{\text{Al}^{\text{VI}}}{\text{Al}^{\text{VI}} + \text{Mg} + \text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mn} + \text{Ti}}.$$

Основной вклад в значения $K_D^{\text{Al}^{\text{VI}}}$ и X_{Al} при этом, естественно, приходится на Al^{VI} , Mg, Fe^{2+} и Fe^{3+} . Связь $K_D^{\text{Al}^{\text{VI}}}$ с ΔZ^p , $T - P - V$ -параметрами реакции следует из общих выражений:

$$K_D = \exp \left(\frac{\Delta Z}{RT} \right) \text{ и } \int_{\ln K_D^{(1)}}^{\ln K_D^{(2)}} d \ln K_D = \frac{1}{RT} \int_{P_1}^{P_2} \Delta V^p dP.$$

В литературе накоплено пока не слишком много химических анализов сосуществующих Мус и Хл, так как выделение их мономинеральных фракций представляет большие трудности; в основном все данные по их составам и значениям X_{Al} приводятся в справочнике (⁽⁴⁾). Особую ценность представляют те из них (табл. 1), которые удалось привязать к значениям T , используя уже известные Мус — Пл- (⁽⁵⁻⁷⁾) и Бт — Гр- (⁽¹⁾) палеотермометры и данные по критическим минеральным ассоциациям (^(1, 8)).

При помощи данных табл. 1 удалось обойти необходимость прицезионного определения значений ΔZ^p . Полученные изотермы $100-450^\circ \text{C}$ распре-

* Здесь и ниже обозначения: Мус — мусковит, Хл — хлорит, Хлд — хлоритонд, Ст — ставролит, Гр — гранат, Пл — плагиоклаз, Кв — кварц, Ки — кшанит, Анд — андалузит, Эп — эпидот, Бт — биотит, Хл-ди — диоктаэдрический хлорит. У. в. — удельный вес, V — молекулярный объем, ΔZ^p — приращение изобарно-изотермического потенциала реакции, P — давление, T — температура, R — газовая постоянная.

деления Al^{VI} в Мус и Хл показаны на рис. 1; пунктир ограничивает здесь область составов как Мус, не имеющих полных твердых растворов с Бг, так и триоктаэдрических 14 Å-хлоритов, также характеризующихся разрывом смесимости с Al-Хл-ди.

Представлялось также весьма важным оценить влияние давления на показания Мус — Хл-термометра, так как известно, например, что Мус из глаукофановых сланцев высокого давления, однотипных на температуре формирования с зелеными сланцами низкого давления, обогащены Mg. Оценочный расчет по приводившемуся выше $P-T-V$ -уравнению был произведен для Хл — Мус-пар, X-составы и у.в. которых заимствованы из работ (⁹, ¹⁰) и которые были приведены при помощи стехиометрических коэффициентов с учетом однотипности структурных позиций Al^{VI} и Fe^{3+} :

$$0,49 \text{ Хл} + 0,58 \text{ Мус} = 0,54 \text{ Мус} + 0,53 \text{ Хл}$$

X_{Al}	0,31	0,78	0,91	0,27
У.в.	3,208	2,88	2,82	2,948
V	212,45	139,39	141,54	207,31

Полученные для этих минеральных пар значения $K_D^{Al^{VI}}$ 7,89 и 27,34 отвечали температурам 215 и 415° С соответственно. Подстановка этих данных в $K_D - P - T - V$ -уравнение

$$P_2 = \frac{2,3 \cdot 82,06 (215 + 273) \cdot (\lg 7,89 - \lg 27,34)}{1,35 \cdot 10^3} + 0 = -37,5 \text{ кбар}$$

приводит к выводу, что для увеличения Al^{VI} Мус, равновесного с Хл, на $\Delta X_{Al} = 0,91 - 0,78 = 0,13$, необходимо при 215° понизить давление на ~37,5 кбар. Тот же эффект перераспределения элементов достигается при прочих равных условиях при повышении T на ~200° (от ~215 до ~415°). С учетом данных (⁸) это позволяет наметить сетку линий $K_D^{Al^{VI}}$ в координатах $P_{общ} - T$ на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что игнорирование влияния давления при использовании Мус — Хл-палеотермометра не вносит существенных ошибок при определении T процессов ката-метагенеза и зеленосланцевого метаморфизма. Однако такие ошибки могут достигать ~50°, если не учитывать влияния давления при составлении Мус — Хл-палеотермометрических данных для зон регионального эпигенеза ($P = 1-3$ кбар) и глаукофансланцевого метаморфизма (при $P > 10-15$ кбар).

Судя по приводимым в литературе данным о составе сосуществующих Мус и Хл, температуры формирования зеленосланцевых пород области Далраиан в Шотландии (⁸) составляли 150—300°, метанелитов из штата Вермонт в США (¹¹) — 300—450° (наряду с другими минералами при повышении температуры здесь получают развитие Гр и Pl_{20-30}), глаукофановых сланцев Францисканской формации штата Калифорния в США (¹²) ~300—350°. Интересные данные получены нами (совместно с М. С. Дюфуром и А. Кольцовым) для зеленосланцевых пород метаморфических зон Среднего хребта на Камчатке, где в метанелитах удалось установить повышение температуры с запада на восток от ~200 до >450°.

В связи с последним исследованием необходимо привести несколько замечаний методического характера. Состав Мус и Хл определялся методами рентгеновской дифрактометрии (ДРОН-1 CuK_{α}) из навесок ~10—20 мг. Примесь Кв, остававшаяся в ходе приготовления стандартных препаратов методом отмучивания в воде фракции <0,001 мм, использовалась нами в качестве внутреннего эталона для рентгеновских определений. Для оценки состава Мус измерялось положение рефлексов 060 и 0.0.10 (⁶, ⁷). При апробировании приемов рентгеновского определения состава Хл предпочтение было отдано методам, основанным на измерении положения рефлексов ((¹³) и др.), а не их интенсивностей (¹⁴), так как в последнем случае воз-

никали затруднения, связанные с определением степени текстурирования пластинчатых частиц Хл в препаратах. Оказалось, что приближенная оценка Al^{VI} в формуле Хл может быть проведена по величинам Al^{IV} , а $(R^{2+})^{VI}$ как $6 - Al^{VI}$, так как формульная группа $Y \approx 6$. Судя по сводке (9), между содержанием Al^{IV} и Al^{VI} в формулах Хл существует положительная кор-

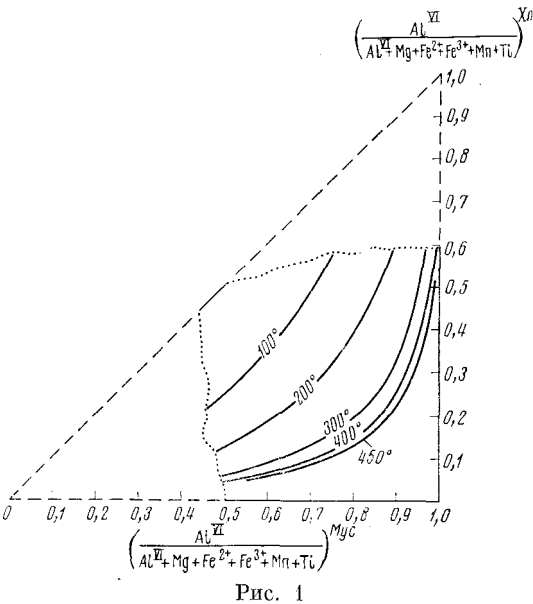


Рис. 1

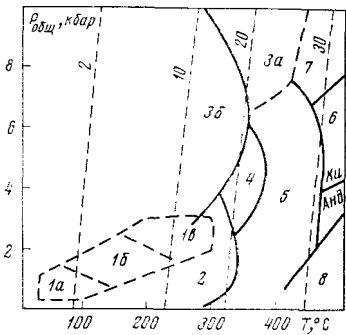


Рис. 2

Рис. 1. Температурная зависимость распределения атомных количеств $Al^{VI}/(Al^{VI} + Mg + Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mn + Ti)$ в сосуществующих Мус и Хл (объяснения в тексте)

Рис. 2. Термодинамические условия ката-метагенеза (15) и некоторых фаций регионального метаморфизма (16). 1а — P - T -поле начального, 1б — позднего катагенеза, 1в — то же начального и позднего метагенеза; 2-8 — фации: 2 — цеолитовая или пумпеллит-пренитовая, 3а — глаукофан-лавсонитовая, 3б — глаукофан-цоизитовая, 4 — пумпеллит-актинолитовая, 5 — зеленых сланцев, 6 — эпидот-амфиболитовая, 7 — цоизит-кнапит-кварцевых сланцев, 8 — куммингтонитовых амфиболитов. Штриховые линии $K_D^{Musc-Hl}$ (указаны значения)

реляционная связь. Величина погрешности в определении T по Мус — Хл-палеотермометру при допущении $Al^{IV} \approx Al^{VI}$ в 80 случаях из 100 для Хл около ± 30 . Отмеченные неточности замеров в значительной степени компенсируются возможностью быстрого накопления рентгеновских определений составов Хл вследствие простоты дифрактометрических приемов опре-

Таблица 1

Основные градуировочные данные для вывода мусковит-хлоритового палеотермометра

Мус		Хл		$K_D^{Al^{VI}}$	$T, ^\circ C$	Тип термометра
анал. из табл. III в (4)	$X_{Al^{VI}}$	анал. из табл. III в (4)	$X_{Al^{VI}}$			
47	0,887	28	0,207	30,07	450	Бт — Гр (1)
11	0,908	21	0,257	28,53	~ 430	Кв — Кп — ЭП — Хлд по петрогенетической сетке (1), рис. 152)
40	0,863	25	0,213	23,28	360	Мус — Пл (6,7)
37	0,842	24	0,223	18,57	300	Мус — Пл (6,7)
118	0,726	52	0,271	8,04	220	(8)

деления. Возрастание температуры с увеличением степени метаморфизма пород выявилось вполне отчетливо. Естественно, определения составов упомянутых минералов рентгеновскими методами эффективны, если Хл не относится к нукеитам, а Мус не обогащены сильно Li, Rb, Cs, Ba. Однако такие отклонения в составе в целом не характерны для регионально метаморфизованных пород. В дальнейшем возможности применения Мус — Хл-палеотермометра могут быть расширены с внедрением в практику петрологических исследований методов микронзонного определения состава Мус и Хл.

Ленинградский государственный университет
им. А. А. Жданова

Поступило
20 VII 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. Л. Перчук, Равновесия породобразующих минералов, «Наука», 1970.
- ² А. А. Маракушев, Проблемы минеральных фаций метаморфических и метасоматических горных пород, «Наука», 1965. ³ В. И. Муравьев, А. Л. Салынь, В сб.: Эпигенез и его минеральные индикаторы, «Наука», 1971. ⁴ Л. Л. Перчук, Сосуществующие минералы, Л., 1971. ⁵ Н. В. Котов, Р. И. Милькевич, С. И. Турченко, ДАН, т. 184, № 5 (1969). ⁶ Р. И. Милькевич, Н. В. Котов, В сб.: Вopr. магматизма и метаморфизма, т. 4, Л., 1972. ⁷ М. С. Дюфур, Н. В. Котов, Изв. АН СССР, сер. геол., № 10 (1972). ⁸ М. J. McNamara, Geol. Förening. Stockholm Förh., v. 87, Part 3, 347 (1965).
- ⁹ К. Б. Кепежинская, Статистический анализ хлоритов и их парагенетические типы, «Наука», 1965. ¹⁰ У. А. Дир, Р. А. Хауи, Дж. Зусман, Породообразующие минералы, т. 3, М., 1966. ¹¹ М. L. Crawford, Contr. Mineral. and Petrol., v. 13, № 3, 269 (1966).
- ¹² D. E. Lee, R. G. Coleman et al., Geol. Surv. Res., Ch. C, 148 (1966). ¹³ S. W. Bailey, Clay and Clay Mineral., v. 20, 381 (1972). ¹⁴ К. Oinuma, S. Shimoda, T. Sudo, J. Toyo Univ. Tokyo, Japan, № 15, I, (1972). ¹⁵ Н. В. Логвиненко, Постдиагенетические изменения осадочных пород, «Наука», 1968. ¹⁶ В. А. Глебовицкий, Проблемы эволюции метаморфических процессов в подвижных областях, «Наука», 1973.