

## Минеральные геотермометры для низкотемпературных парагенезисов

А. Р. Котельников, Н. И. Сук, З. А. Котельникова, Т. И. Щекина, Г. М. Калинин  
Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка

[kotelnik@iem.ac.ru](mailto:kotelnik@iem.ac.ru)

В гидротермальных условиях при температуре 200–250°C  $P=0.5$  кбар проведена экспериментальная калибровка хлоритового геотермометра [Cathelineau & Neiva, 1985], основанного на распределении алюминия между октаэдрической и тетраэдрической позициями структуры. Показана хорошая сходимость наших опытных данных с результатами [Cathelineau & Neiva, 1985]. При температурах 200–500°C,  $P=0.5–1.0$  кбар проведены исследования структурного упорядочения альбита и выведена зависимость для оценки температур по параметру  $\Delta 131$ . С использованием хлоритового и альбитового геотермометров, а также ряда других, основанных на распределении главных и малых элементов между сосуществующими минералами, и методов изучения флюидных включений определены температуры минералогенеза палеовулканитов Западной Сибири.

*Ключевые слова:* хлорит, альбит, распределение алюминия по структурным позициям, флюидные включения, температуры минералогенеза

**Ссылка:** Котельников, А. Р., Н. И. Сук, З. А. Котельникова, Т. И. Щекина, Г. М. Калинин (2012), Минеральные геотермометры для низкотемпературных парагенезисов, *Вестник ОНЗ РАН*, 4, NZ9001, doi:10.2205/2012NZ\_ASEMPG.

Зеленосланцевая низкотемпературная стадия (фация) метаморфизма широко распространена в различных частях нашей страны – от Кавказа до Камчатки. Часто именно с этой стадией метаморфизма связаны рудные месторождения, в том числе и золото-серебряные. Поэтому оценка РТХ-параметров их образования представляет значительный интерес. Минеральные парагенезисы низкотемпературных фаций метаморфизма представлены в основном ассоциацией:  $Fsp + Chl + Qz \pm Zeol \pm Cb$ . Полевые шпаты представлены, как правило, альбитом и калиевым полевым шпатом. Структурное состояние полевых шпатов, как правило, близко к предельно упорядоченным разностям. Хлориты образуются за счет процесса хлоритизации темноцветных минералов (Px, Amf, Vt) при снижении T,P- параметров и увеличении потенциала воды. В ряде случаев (при соответствующих составах породы и флюида) образуются цеолиты и карбонаты.

Вся возможная информация о температурах образования данных парагенезисов может быть получена изучением представленных породообразующих минералов.

### **1. Полевые шпаты**

Существует два метода оценки температур по полевым шпатам:

1) Распределение элементов (Na, K, Ca) между сосуществующими полевыми шпатами. Данный метод откалиброван (на основании имеющихся экспериментальных данных) в работе Н. Nekwasil [1994].

2) Исследование структурного состояния полевых шпатов. Этот метод основан на экспериментальном изучении распределения алюминия по неэквивалентным позициям структуры. Цель нашей работы состояла в изучении процессов синтеза упорядоченных альбитов при низкой температуре (200-500°C) и построение зависимости  $\Delta 131$  от температуры при  $T < 500$  С. Синтез альбита проводили в гидротермальных условиях при температуре 200÷500°C и давлении 0.5÷1.0 кбар. В качестве исходных смесей применяли гелевые смеси альбитового состава с добавлением 10 мас.% аморфного  $SiO_2$ ; синтез проводили в растворах NaOH и  $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$  концентрацией 2÷10 мас.%. Длительность опытов достигала 65 суток. В исходную смесь добавляли природный низкий альбит в количестве 1÷2% от массы навески. В продуктах опыта фиксировали низкий альбит и кварц, в некоторых опытах присутствовало небольшое количество силикатов натрия. Рентгеновское изучение позволило уточнить параметры элементарных ячеек альбитов. Впервые удалось синтезировать предельно

## КОТЕЛЬНИКОВ И ДР.: МИНЕРАЛЬНЫЕ ГЕОТЕРМОМЕТРЫ

упорядоченные альбиты ( $\Delta 131=1.09$  для Cu-K<sub>a</sub>) при 200 С и 0.5 кбар. Рассчитана аналитическая зависимость степени упорядочения альбита от температуры, которая может использоваться в качестве геотермометра для альбит-содержащих минеральных ассоциаций:

$$t, (^{\circ}\text{C}) = [-1416.3 + 1478.6 * (\Delta 131)] \pm 25^{\circ}\text{C}.$$

Данное уравнение адекватно работает в интервале температур 100÷500°C.

### 2. Хлорит

Хлорит представляет собой слоистый гидроалюмосиликат магния, марганца и железа с общей формулой  $(\text{Mg, Mn, Fe})_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}[\text{OH}]_8$ . Следует отметить, что алюминий может занимать в структуре как тетраэдрические, так и октаэдрические структурные позиции. Хлорит характеризуется моноклинной сингонией, пространственная группа  $c2/m$ . В работе [Cathelineau M., Neiva D., 1985] на основе изучения составов природных хлоритов в зоне современной гидротермальной системы получены зависимости распределения алюминия между неэквивалентными позициями структуры хлорита, а также заполнения вакансий в зависимости от температуры. Мы экспериментально откалибровали этот термометр при 200 и 250°C и давлении 0.5 кбар. Опыты проводили по ампульной методике. В качестве исходных материалов применяли синтетические гелевые смеси хлоритового состава. В исходные навески добавляли около 1 мас.% природного хлорита. Одномолярные растворы фторидов калия и натрия, карбоната натрия и дистиллированную воду использовали в качестве компонентов флюидообразующей смеси. Опыты проводили в автоклавах; точность регулировки температуры составляла  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , давления  $\pm 50$  бар. Длительность опытов составляла до 30 суток. Продукты опытов изучали методом рентгенофазового и микронзондового анализов. Показано, что в продуктах опытов, кроме хлорита, встречаются магнетит и кварц. Микронзондовый анализ показал близость составов синтетических хлоритов к формуле  $(\text{Mg, Mn, Fe})_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}[\text{OH}]_8$ . На основе опытных данных выполнен расчет заселенности тетраэдрической позиции структуры алюминием. Показано, что экспериментальные данные близки к данным работы [Cathelineau M., Neiva D., 1985]. Для оценок температур предложены следующие уравнения:

$$T, ^{\circ}\text{C} = 39.73 + 180.64 * (\text{Al}^{\text{IV}}) (\pm 15^{\circ}\text{C})$$

$$T, ^{\circ}\text{C} = 267.35 - 271.67 * (6 - \Sigma_{\text{VI}}) (\pm 15^{\circ}\text{C})$$

где  $(\text{Al}^{\text{IV}})$  - количество алюминия в тетраэдрической координации;  $(6 - \Sigma_{\text{VI}})$  - количество вакансий в октаэдрической позиции (формульные единицы). Данные уравнения применимы в интервале температур 150–300 °C

### 3. Оценка температур минералогенеза палеовулканитов.

С использованием хлоритового и альбитового геотермометров, а также ряда других геотермометров, основанных на распределении главных и малых элементов между сосуществующими минералами, и методов изучения флюидных включений определены температуры минералогенеза палеовулканитов Западной Сибири. Главные минералы изученных парагенезисов: Ksp + Ab + Chl + Qz. Вместе с ними встречены и акцессории: Cal + Ar + ZnS. По результатам полевошпатовой термометрии выделяются два температурных процесса:

– среднетемпературный  $270 \pm 23^{\circ}\text{C}$

– низкотемпературный  $210 \pm 14^{\circ}\text{C}$ .

По результатам хлоритовой термометрии выделяются два температурных процесса:

– среднетемпературный  $250 \pm 10^{\circ}\text{C}$

– низкотемпературный  $203 \pm 17^{\circ}\text{C}$ .

Флюидные включения фиксируют два температурных процесса :

- среднетемпературный 240-290°C ( $280 \pm 8^{\circ}\text{C}$ ) – ФВ в кварце

- низкотемпературный ~120-170°C ( $145 \pm 20^{\circ}\text{C}$ ) – ФВ в кальците.

### Выводы

1. Экспериментально изучены процессы упорядочения альбита в гидротермальных условиях. Выведено уравнение для оценки температур по степени упорядочения альбита.

2. При температуре 200 и 250°C откалиброваны зависимости распределения элементов между неэквивалентными позициями структуры. Показано, что этот эффект может быть применен для целей термометрии

## КОТЕЛЬНИКОВ И ДР.: МИНЕРАЛЬНЫЕ ГЕОТЕРМОМЕТРЫ

3. С использованием полевошпатовой, хлоритовой термометрии и методов изучения флюидных включений в минералах определены температуры минералогенеза низкотемпературного метаморфизма (на примере палеовулканитов Западной Сибири).

### **Литература**

Cathelineau, M., D. Neiva (1985). A chlorite solid solution geothermometer the Los Asufres (Mexico) geothermal system, *Contrib.Mineral. Petrol.*, V.91, pp. 235-244.

Nekvasil, H. (1994). Ternary feldspar/melt equilibria: a review, *Feldspars and their reactions*. Ed. I.Parsons. NATO ASI series, V. 421, 650 p.