

УДК 552.08:550.89

СТРУКТУРНОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ ПОЛЕВЫХ ШПАТОВ КАК ИНДИКАТОР ТЕМПЕРАТУРЫ МИНЕРАЛОГЕНЕЗА

© 2024 г. А. Р. Котельников^{a, *}, Т. И. Щекина^b, Н. И. Сук^{a, **},
З. А. Котельникова^c, Т. В. Антоновская^d

^aИнститут экспериментальной минералогии им. Д.С. Коржинского РАН (ИЭМ РАН)

ул. акад. Осипьяна, 4, г. Черноголовка Московской обл., 142432 Россия

^bМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Геологический факультет

Ленинские горы, 1, г. Москва, 119991 Россия

^cИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН)

Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

^dИнститут геологии им. Н.П. Юшкина РАН (ИГ Коми НЦ УрО РАН)

ул. Первомайская, 54, г. Сыктывкар, Республика Коми, 167982 Россия

*e-mail: kotelnik1950@yandex.ru; **e-mail: sukni@iem.ac.ru

Поступила в редакцию 03.08.2023 г.

После доработки 04.12.2023 г.

Принята к публикации 24.12.2023 г.

Экспериментально изучены процессы упорядочения альбитов в области невысоких температур 500–150 °С при давлении 0.5–1 кбар в щелочных растворах гидроксида натрия при избытке кремнезема. На основании данных наших опытов и литературных данных по упорядочению альбитов и кислых плагиоклазов выведены зависимости, позволяющие оценивать температуру по степени их структурного упорядочения. Определены температуры для плагиоклаз-содержащих парагенезисов различных природных комплексов зеленосланцевой фации метаморфизма.

Ключевые слова: полевые шпаты, экспериментальное исследование, структурное упорядочение, минеральные термометры

DOI: 10.31857/S0016752524050038, **EDN:** JBRFAQ

ВВЕДЕНИЕ

Процессы упорядочения в полевых шпатах — перераспределения алюминия между неэквивалентными позициями кристаллической структуры могут служить индикатором температуры образования. Для альбитов и твердых растворов плагиоклазов структурного типа $C(-1)$ было предложено использовать межугловое расстояние отражений 131 и 1–31 как индикатор степени структурного упорядочения. Этот параметр принято обозначать как $\Delta 131$ (Cu-K $\alpha 1$). Принято использовать межугловое расстояние для длины волны $\lambda = 1.5406$ (Cu-K $\alpha 1$). Для полностью упорядоченного, так называемого “низкого” альбита (low-Ab), весь алюминий сосредоточен в позиции T₁₀ и значение $\Delta 131$ (Cu-K $\alpha 1$) равно ~1.0. Такие альбиты образуются при относительно низких температурах. При высокой температуре алюминий равномерно распределяется по всем тетраэдрам каркаса (Al, Si)O₄. Такие разупорядоченные альбиты называются “высокими” (high-Ab), величина $\Delta 131$ (Cu-K $\alpha 1$) для них равна ~2.0. Измеряя межугловое расстояние $\Delta 131$ можно оценить структурное

состояние альбита. А выполнив синтезы альбита при различных температурах, можно оценить зависимость величины $\Delta 131$ от температуры. Впервые количественные данные о связи структурных параметров и степени упорядочения для плагиоклазов из природных комплексов были получены в работе (Vambauer et al., 1967). В данной работе впервые приведена диаграмма степени упорядочения (параметр $\Delta 131$) от состава твердого раствора плагиоклаза. Экспериментальные данные по упорядочению плагиоклазов впервые были получены в работе (Eberhard, 1967). Также был выполнен ряд экспериментальных исследований по упорядочению альбитов и твердых растворов плагиоклазов (Eberhard, 1967; Martin, 1969; Сендеров и др., 1971; Mason, 1979; Kroll, Muller, 1980; Бычков, Котельников, 1982; Dujon, Lagache, 1984; Шведенкова и др., 1989; Котельников, 1995). Данные исследований по упорядочению альбита представлены в табл. 1 и на рис. 1а. Однако в области невысоких температур (менее 400 °С) данных недостаточно. Поэтому целью нашей работы было экспериментальное изучение упорядочения альбита при температуре 500–150 °С ($P = 0.2 \div 1$ кбар). В работах

(Smith, 1984) и (Carpenter, 1993) представлены фазовые диаграммы плагиоклазов, построенные для умеренных давлений (менее 3–4 кбар). Из этих диаграмм следует, что область структурного типа $C(-1)$ существует при составах от чистого альбита до примерно An_{50} и при температуре от 400 до 1000 °С. Поэтому можно, на основе опытных данных, уточнить диаграмму (Vambauer et al., 1967) и оценить возможность использования этой диаграммы для целей минеральной термометрии.

МЕТОДИКА ОПЫТОВ

Все опыты по изучению процессов упорядочения альбитов проводились в гидротермальных условиях по ампульной методике.

Стартовые материалы. В качестве исходных материалов применяли стекла и гели альбитового состава. Стекла были изготовлены плавлением природных альбитов и смесей оксидов альбитового состава в печи КО-14 при температуре 1300 °С в течении 12 часов.

Аппаратура. Опыты при температуре 400 ÷ 500 °С проводили на гидротермальных установках с внешним нагревом и холодным затвором (конструкции ИЭМ РАН). На установках использовали эксцентриковый затвор с водяным охлаждением. Точность регулировки и контроля температуры была не более ± 2 °С, давления ± 50 бар. Опыты при 150 ÷ 300 °С ставили в автоклавах с термоуплотняющимся затвором, конструкции ИЭМ РАН.

Таблица 1. Экспериментальные данные по структурному упорядочению альбитов при различных температурах

T , °С	Δ^{131} (Cu-K α)	Ссылка	T , °С	Δ^{131} (Cu-K α 1)	Ссылка
1000	2.01	1	550	1.76	6
900	1.98	2	550	1.59	7
850	1.95	2	500	1.43	3
800	1.92	2	500	1.42	2
800	1.94	3	500	1.40	5
800	1.88	4	500	1.60	6
750	1.89	3	500	1.32	7
700	1.83	3	500	1.24	4
700	1.87	4	475	1.26	7
625	1.78	5	450	1.49	6
600	1.78	5	450	1.20	7
600	1.78	6	400	1.28	6
600	1.80	4	400	1.20	7
550	1.60	3	350	1.25	6
550	1.50	5	350	1.17	7

Примечания. 1 — Kroll, Muller, 1980; 2 — McKenzie, 1957; 3 — Eberhard, 1967; 4 — Котельников, 1995; 5 — Mason, 1979; 6 — Martin, 1969; 7 — Сендеров и др., 1971.

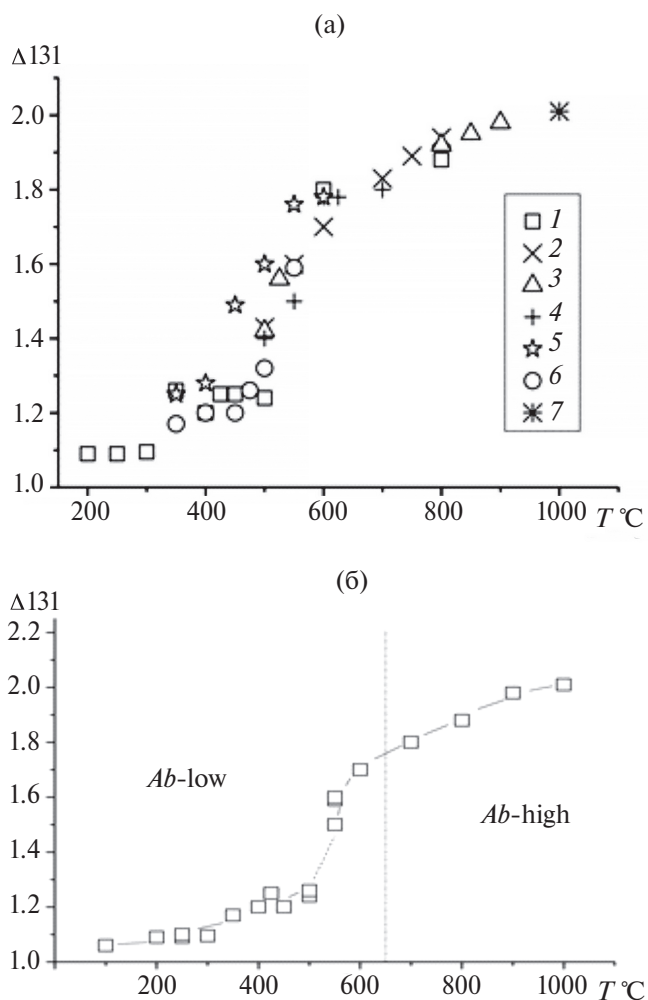


Рис. 1. Упорядочение альбита в зависимости от температуры, по данным различных работ (номера точек соответствуют номерам в табл. 1) (а); структурный переход высокий-низкий альбит по данным работы (Сендеров, Щекина, 1976) (б).

Методика опытов. Опыты проводили в платиновых и золотых ампулах диаметром 5 мм, объемом 500–600 мкл. В ампулы загружали смесь порошков стекол альбита и кварца, заливали необходимое количество растворов NaOH и дистиллированной воды. Затем ампулы заваривали электродуговой сваркой и проверяли на герметичность, взвешивали и помещали в реакторы установок высокого давления (автоклавы). Ввод в режим занимал около 1–1.5 часов. Выдержка в режиме опытов составляла от 22 до 45 суток. Время закалки опытов (от температуры 500 до 50 °С) не превышало 3 минут. Герметичность ампул после опытов контролировали весовым методом. Условия проведения и результаты опытов представлены в табл. 2. Следует отметить, что щелочная среда в присутствии кварца, активизирует процессы рекристаллизации альбита. Этот метод был использован ранее для изучения процессов упорядочения альбита в работах (Martin, 1969; Сендеров и др., 1971).

Методика анализов продуктов опытов. Состав синтезированных твердых продуктов опытов определяли методом локального рентгеноспектрального микроанализа с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega II XMU (Tescan, Чехия), оснащенного системой для рентгеноспектрального микроанализа INCA Energy 450 с энергодисперсионным (INCAx-sight) и кристалл-дифракционным (INCA wave 700) рентгеновскими спектрометрами (Oxford Instruments, Англия) и программной платформой INCA Energy+. Точность определения состава составляет 0.2 мас. % элемента при использовании энергодисперсионного спектрометра. Рентгеновское изучение синтезированных альбитов проводили на дифрактометрах HZG-4 и "Bruker" в режиме постоянного сканирования. В качестве внутреннего стандарта применяли кремний спектральной чистоты ($a = 5.4307$ [Å]). Использовали полигональный метод коррекции рентгеновских отражений (Kroll et al., 1995; Котельников, 1995). Полученные результаты позволили рассчитать параметры элементарных ячеек твердых растворов. Уточнение параметров элементарных ячеек проводили по 45–103 отражениям в интервале углов $6.5\text{--}44.5^\circ$ (Θ). Расчет параметров выполняли с использованием программ LCC, PUDI, MINCRYST (Burnham, 1991; Chichagov, 1994).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Условия и результаты опытов представлены в табл. 2. Видно, что в температурном интервале от 150 до 500°C происходил устойчивый синтез альбита, часто в ассоциации с кварцем (табл. 2). Микрондовый анализ показал, что составы синтезированных альбитов отвечают формуле альбита ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Примеси таких элементов как калий, кальций, железо практически отсутствуют. Параметры элементарных ячеек синтезированных альбитов представлены в табл. 3. Зависимость параметра упорядочения $\Delta 131$ (Cu-K $\alpha 1$) от температуры (в интервале от 150 до 500°C) описывается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} \Delta 131(\text{Cu} - \text{K}\alpha 1) = & 1.091 - 0.078 \times \\ & \times (T/100) + 0.04964 \times (T/100)^2 - \\ & - 0.005295 \times (T/100)^3 \\ & (n = 16; S_x = 0.023). \end{aligned} \quad (1)$$

В свою очередь, наблюдается линейная зависимость углов элементарной ячейки α и γ от величины $\Delta 131$ (Cu-K $\alpha 1$):

$$\begin{aligned} \alpha, [^\circ] = & 95.168 - 0.8188 \times \\ & \times \{\Delta 131 (\text{Cu} - \text{K}\alpha 1)\}; \\ & (n = 16; r_x = 0.96; S_x = 0.02). \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \gamma, [^\circ] = & 84.613 + 2.796 \times \{\Delta 131 (\text{Cu} - \text{K}\alpha 1)\}; \\ & (n = 16; r_x = 0.99; S_x = 0.02). \end{aligned} \quad (3)$$

В работе (Carpenter, 1993) показано, что для твердых растворов плагиоклазов можно использовать диаграмму состав — параметр $\gamma, [^\circ]$, такая диаграмма практически эквивалентна диаграмме состав-параметр $\Delta 131$ (Cu-K $\alpha 1$), предложенной в работе (Bambauer et al., 1967).

На основании наших опытных данных и результатов работ (McKenzie, 1957; Eberhard, 1967; Martin, 1969; Сендеров и др., 1971; Сендеров, Щекина, 1976; Mason, 1979; Kroll, Muller, 1980; Котельников, 1995) было выведено уравнение для расчета температуры по параметру $\Delta 131$ (Cu-K $\alpha 1$) для альбитов:

$$\begin{aligned} T^\circ\text{C}/1000 = & -11.794 + 24.0798 \times \\ & \times (d131) - 15.7357 \times \\ & \times (d131)^2 + 3.44235 \times (d131)^3 (\pm 20^\circ\text{C}), \end{aligned} \quad (4)$$

где d131 — параметр $\Delta 131$ (Cu-K $\alpha 1$).

При выводе и уточнении параметров вышеприведенного уравнения использовали данные, проходящие по статистическим критериям (отклонение выпадающих результатов при уровне доверительной вероятности 95 %).

На рис. 2 приведена диаграмма состав плагиоклазов — параметр $\Delta 131$ (Cu-K $\alpha 1$) для оценки температуры по степени упорядочения полевых шпатов. Для оценки температуры по величине $\Delta 131$ (Cu-K $\alpha 1$) были использованы уравнения вида:

1) в интервале составов $An_5\text{--}An_{35}$:

$$\begin{aligned} T^\circ\text{C}/1000 = & a_0 + a_1 \times d131 + a_2 \times \\ & \times (d131)^2 + a_3 \times (d131)^3 + 0.007, \end{aligned} \quad (5)$$

где d131 — параметр $\Delta 131$ (Cu-K $\alpha 1$); в свою очередь, параметры $a_0 \dots a_3$ рассчитываются по следующим уравнениям в зависимости от состава плагиоклаза:

$$\begin{aligned} a_0 = & -8.859 + 9.225 \times X - 2553.6 \times \\ & \times X^2 + 3076.5 \times X^3, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} a_1 = & 18.026 - 12.504 \times X + 4590.625 \times \\ & \times X^2 - 6570.04 \times X^3, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} a_2 = & -11.658 + 2.93708 \times X - 2721.97 \times \\ & \times X^2 + 4401.79 \times X^3, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} a_3 = & 2.545 + 0.72129 \times X + 532.577 \times \\ & \times X^2 - 944.20 \times X^3, \end{aligned} \quad (9)$$

где X — мольная доля кальция в плагиоклазе.

2) в интервале составов $An_{36}\text{--}An_{50}$:

$$\begin{aligned} T^\circ\text{C}/1000 = & b_0 + b_1 \times d131 + b_2 \times \\ & \times (d131)^2 - 0.044, \end{aligned} \quad (10)$$

Таблица 2. Условия опытов по синтезу упорядоченного альбита при 150 ÷ 500°С и давлении 0.2 ÷ 1 кбар

№ опыта	T, °С	P, кбар	Навеска	Раствор	k**	Длит. сутки	Фазовый состав продуктов
6309	150	~0.2	110 мг смеси <i>Ab</i> * + 20 мг <i>Qz</i>	90 мкл 5 % NaOH	1.38	65	<i>Ab</i>
6311	200	0.5	105 мг смеси <i>Ab</i> + 25 мг <i>Qz</i>	130 мкл 2 % NaOH	0.98	50	<i>Ab</i> + <i>Qz</i>
6312	200	0.5	105 мг смеси <i>Ab</i> + 25 мг <i>Qz</i>	130 мкл 5 % NaOH	0.95	50	<i>Ab</i> + <i>Qz</i>
6313	200	0.5	87 мг смеси <i>Ab</i> + 21 мг <i>Qz</i>	110 мкл 8 % NaOH	0.91	50	<i>Ab</i>
6337	250	0.5	100 мг смеси <i>Ab</i> + 20 мг <i>Qz</i>	80 мкл 2 % NaOH	1.47	45	<i>Ab</i> + <i>Qz</i>
6338	250	0.5	100 мг смеси <i>Ab</i> + 20 мг <i>Qz</i>	80 мкл 5 % NaOH	1.43	45	<i>Ab</i> + <i>Qz</i>
6339	250	0.5	100 мг смеси <i>Ab</i> + 20 мг <i>Qz</i>	80 мкл 8 % NaOH	1.39	45	<i>Ab</i> + <i>Qz</i>
6340	250	0.5	90 мг смеси <i>Ab</i> + 10 мг <i>Qz</i>	113 мг Na ₂ SiO ₃ × 9H ₂ O + 10 мг H ₂ O	0.81	45	<i>Ab</i>
5818	300	0.75	80 мг смеси <i>Ab</i> + 21 мг <i>Qz</i>	150 мкл 5 % NaOH	0.64	54	<i>Ab</i>
5921	300	0.75	95 мг смеси <i>Ab</i> + 24 мг <i>Qz</i>	145 мкл 5 % NaOH	0.76	54	<i>Ab</i> + <i>Qz</i>
5703	400	1	100 мг смеси <i>Ab</i> + 20 мг <i>Qz</i>	110 мкл 5 % NaOH	1.04	40	<i>Ab</i> + <i>Qz</i>
5704	400	1	100 мг смеси <i>Ab</i> + 20 мг <i>Qz</i>	100 мкл 8 % NaOH	1.11	40	<i>Ab</i> + <i>Qz</i>
5344a	425	1	90 мг смеси <i>Ab</i> + 10 мг <i>Qz</i>	70 мкл 5 % NaOH	1.36	44	<i>Ab</i>
5345	425	1	95 мг смеси <i>Ab</i> + 10 мг <i>Qz</i>	80 мкл 8 % NaOH	1.22	44	<i>Ab</i>
322a	450	1	120 мг смеси <i>Ab</i> + 25 мг <i>Qz</i>	110 мкл 5 % NaOH	1.25	30	<i>Ab</i> + <i>Qz</i>
323	450	1	120 мг смеси <i>Ab</i> + 30 мг <i>Qz</i>	110 мкл 5 % NaOH	1.30	30	<i>Ab</i> + <i>Qz</i>
5850	500	1	170 мг смеси <i>Ab</i> + 40 мг <i>Qz</i>	230 мкл 14 % NaOH	0.80	30	<i>Ab</i>

* Смеси *Ab* — смесь геля альбита и низкого альбита в соотношении 20:1.
** k — соотношение навеска/флюид в опытах. *Ab* — альбит, *Qz* — кварц.

Таблица 3. Параметры элементарных ячеек альбитов, синтезированных в гидротермальных условиях (T = 150 ÷ 500°С; P = 0.2–1.0 кбар) в присутствии растворов гидроксида натрия и силиката натрия

№ оп.	T, °С	P ¹⁾	a, [Å] ²⁾	b, [Å]	c, [Å]	α, [°]	β, [°]	γ, [°]	V, [Å] ³	Δ131 ³⁾
6309	150	0.2	8.135	12.781	7.161	94.30	116.61	87.57	663.7	1.070
6311	200	0.5	8.136	12.786	7.159	94.26	116.59	87.69	664.1	1.101
6312	200	0.5	8.137	12.788	7.159	94.25	116.60	87.71	664.2	1.087
6313	200	0.5	8.137	12.787	7.159	94.26	116.60	87.69	664.2	1.102
6337	250	0.5	8.137	12.787	7.159	94.27	116.60	87.70	664.2	1.107
6388	250	0.5	8.139	12.786	7.159	94.26	116.61	87.70	664.2	1.092
6339	250	0.5	8.136	12.783	7.160	94.29	116.59	87.65	664.0	1.091
5818	300	0.75	8.138	12.790	7.155	94.19	116.59	87.94	664.2	1.190
5921	300	0.75	8.140	12.796	7.157	94.20	116.63	88.00	664.6	1.218
5703	400	1	8.141	12.795	7.154	94.21	116.60	87.96	664.6	1.211
5704	400	1	8.140	12.793	7.154	94.20	116.60	87.97	664.4	1.210
5343	425	1	8.140	12.795	7.152	94.16	116.58	88.08	664.4	1.242
5344	425	1	8.140	12.791	7.151	94.12	116.57	88.11	664.3	1.244
322a	450	1	8.141	12.802	7.148	94.11	116.57	88.20	664.5	1.278
323	450	1	8.141	12.802	7.146	94.09	116.55	88.23	664.5	1.283
5850	500	1	8.141	12.801	7.150	94.13	116.55	88.16	664.8	1.275

Примечания. 1) давление (кбар); 2) значения параметров элементарных ячеек приведены в ангстремах, углов — в градусах; 3) Δ131 — межугловое расстояние в градусах между отражениями 131 и 1–31 для (Cu-Kα1).

где d131 — параметр Δ131 (Cu-Kα1); в свою очередь, параметры b₀ ... b₂ рассчитываются по следующим уравнениям в зависимости от состава плагиоклаза:

$$b_0 = 4441.35 - 35604 \times X + 95925.8 \times X^2 - 87400 \times X^3, \tag{11}$$

$$b_1 = -4488 + 36002.84 \times X - 97121.8 \times X^2 + 88628 \times X^3, \tag{12}$$

$$b_2 = 1132.17 - 9087.24 \times X + 24547.7 \times X^2 - 22439.5 \times X^3, \tag{13}$$

где X — мольная доля кальция в плагиоклазе.

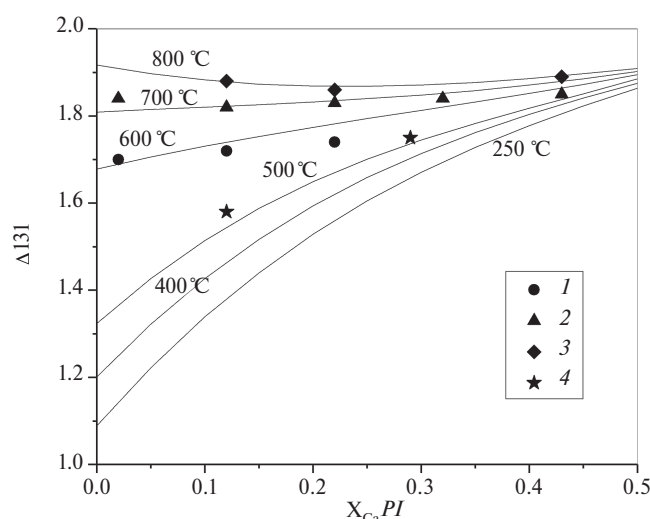


Рис. 2. Зависимость составов плагиоклазов от параметра $\Delta 131$ (Cu-K $\alpha 1$). (Eberhard E., 1967): 1 – 600°C, 2 – 700°C, 3 – 800°C; (Котельников, 1995): 4 – 500°C.

Разработана компьютерная программа для расчета температуры с погрешностью $\pm 25^\circ\text{C}$. Данную программу можно применять в интервале составов плагиоклазов ($X_{\text{Ca}}^{\text{Pl}}$) от 0.05 до 0.5 (An_5 – An_{50}). При меньших значениях кальциевости плагиоклазов лучше работает уравнение (4).

Таким образом показана возможность определения температуры минералогенеза по степени упорядочения альбитов и твердых растворов плагиоклазов структурной группы C(–1).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Нами проведено изучение палеовулкани- тов доюрского основания Рогожниковско-Ля- минской зоны (Западная Сибирь). Породы пред- ставлены метаморфизованными (фация зеленых сланцев) дацитами и риолит-дацитами. Ведущий парагенезис изученных пород $Fsp + Chl + Qz + Cb$. Нами проведено исследование минералов для оценки температур образования изученных па- рагенезисов. Термометрия пород основывалась

на применении двуполевошпатового термоме- тра (Nekvasil, 1993) и хлоритового термометра (Cathelineau, Neiva, 1985). Кроме того, выполняли изучение флюидных включений в кварце. На ос- новании полученных данных оценены температу- ры средне- и низкотемпературного этапов мета- морфизма: 270 и 200°C при давлении 0.5–1 кбар. Проведено уточнение параметров элементарных ячеек альбитов из палеовулкани- тов (обр. 757–207). В этом образце встречены $Ksp + Ab + Chl + Qz$. Ин- тервал температур для данного образца (по дву- полевошпатовому термометру) составил от 530 до 250°C. Данные расчетов ПЭЯ приведены в табл. 4. Полученные значения температур (рассчитаны по уравнению (4) (465; 415 и 396°C) близки к опреде- ленным по двуполевошпатовому термометру.

2. Исследованы полевые шпаты из гранитов рапакиви Салминского плутона (район г. Пит- кяранта, Карелия). Были изучены олигоклазовые оторочки овоидов (Pl -slm) и альбиты (Ab -slm) и ка- лиевые полевые шпаты пертитов (Ksp -slm). Рассчи- танные значения ПЭЯ полевых шпатов представле- ны в табл. 4. Плагиоклаз представлен олигокла- зом An_{16} . Альбит практически чистый, содержание анортита – 2.6 мол. %; ортоклаза – 1.0 мол. %. Калиевый полевой шпат содержит ортоклазовой молекулы 83.5 мол. %; альбитовой 16.1 мол. %. По диаграмме “b–c” (Blasi A., Blasi C., 1993) данный полевой шпат относится к упорядоченным микро- клинам. Расчет по двуполевошпатовому термоме- тру для пертитов распада дает среднюю температу- ру $400 \pm 45^\circ\text{C}$. Оценка температуры для альбита по степени упорядочения по уравнению (1) – 370°C . Расчет температуры по степени упорядочения оли- гоклаза оторочки показывает температуру 340°C . Скорее всего, образование олигоклазовой отороч- ки овоидов проходило при температуре ниже 400°C под воздействием кальций-содержащих гидротер- мальных растворов по реакции $2(\text{Na}, \text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8 + \text{CaCl}_2(\text{aq}) = \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 4\text{SiO}_2\downarrow + 2(\text{Na}, \text{K})\text{Cl}(\text{aq})$. Наличие кристалликов кварца в олигоклазе ото- рочки свидетельствует в пользу приведенной реак- ции. Полученные значения температуры относятся

Таблица 4. Параметры элементарных ячеек полевых шпатов из природных комплексов и оценки температур по степени упорядочения ($\Delta 131$ CuK $\alpha 1$)

№ обр.	a, [Å]	b, [Å]	c, [Å]	α , [°]	β , [°]	γ , [°]	V, [Å ³]	$\Delta 131$	T, °C
757–207 ₁	8.140	12.802	7.148	94.13	116.57	88.18	664.5	1.279	465
757–207 ₂	8.139	12.795	7.153	94.17	116.59	88.03	664.3	1.223	415
757–207 ₃	8.138	12.793	7.154	94.20	116.60	87.96	664.2	1.204	395
Pl-slm	8.144	12.826	7.138	93.96	116.51	88.77	665.6	1.486	340
Ab-slm	8.138	12.784	7.157	94.25	116.68	87.86	663.7	1.183	370
Ksp-slm	8.567	12.948	7.194	91.00	116.03	87.55	716.4	-	-
Pl-fl-1	8.158	12.824	7.134	93.84	116.47	88.98	666.5	1.533	360
Pl-fl2	8.152	12.823	7.136	93.93	116.46	88.76	666.2	1.464	320

к процессам гидротермальной переработки пород на постмагматической стадии.

3. Изучены метаморфические породы формации Финьяльва, о. Сенья, (Заполяная Норвегия). Образец для исследования (2fl) отобран из гнейсогранита, входящего в состав формации Финьяльва, являющейся частью фундамента позднеархейского возраста. Главные породообразующие минералы: кварц, калиевый полевой шпат и биотит. Присутствуют также плагиоклаз, пирит, гранат, хлорит и титанит; акцессорные — циркон, алланит, апатит. Хлорит заполняет трещины в зернах гранатов. Оценки температур по хлоритовому термометру дают значения от 244 до 274 °C. Для расчета температуры по двуполевошпатовому термометру определили средний состав плагиоклаза (Pl-fl): анортит 18.0 мол. %; альбит 79.8 мол. %; ортоклаз 2.2 мол. %. Состав калиевого полевого шпата (Ksp-fl): ортоклаз 93.5 мол. %; альбит 5.4 мол. %, анортит 1.1 мол. %. Расчет по двуполевошпатовому термометру дает температуру 420 ± 45 °C. Результаты расчета параметров элементарных ячеек полевых шпатов формации Финьяльва представлены в табл. 4. По степени упорядочения плагиоклазов мы получаем температуры 320–360 ± 30 °C. Данные температуры относятся к завершающим, низкотемпературным стадиям процессов метаморфизма комплекса Финьяльва.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально изучены процессы упорядочения альбитов при температуре 150–500 °C и давлении 0.2–1 кбар в гидротермальных условиях.

2. На основании полученных данных и работ предыдущих исследователей выведены зависимости для расчета температур по степени упорядочения альбита и твердых растворов плагиоклазов структурного типа C(–1).

3. Изучены полевые шпаты из различных природных комплексов. На основе расчета степени упорядочения изученных полевых шпатов определены температуры минералогенеза на низкотемпературной стадии постмагматического процесса (Салминский плутон). Также определены параметры низкотемпературных процессов метаморфизма пород Рогожниковско-Ляминской зоны и комплекса Финьяльва. Показано хорошее соответствие полученных значений температуры с данными термометрии по другим минеральным термометрам.

Авторы благодарны научному редактору А.В. Боброву и рецензентам за конструктивные замечания.

Работа выполнена в рамках темы НИР ИЭМ РАН № FMUF-2022-0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бычков А.М., Котельников А.Р. (1982) О структурных превращениях плагиоклазов в гидротермальных условиях. *Геохимия*. (7), 1051–1053.
- Котельников А.Р. Изоморфизм в каркасных алюмосиликатах. (1995). Дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Москва: МГУ, 528 с.
- Сендеров Э.Э., Шекина Т.И., Тобелко К.И. (1971) Изучение кристаллизации низкого альбита. *Геохимия*. (8), 963–973.
- Сендеров Э.Э., Шекина Т.И. (1976) О стабильности структурных форм альбита и условиях образования их в природе. *Геохимия*, (2), 159–175.
- Шведенкова С.В., Шведенков Г.Ю., Стрелетов А.Н. (1989) Фазовые субсолидусные равновесия в системе альбит-анортит-H₂O при давлении 100 МПа. *Геология и геофизика*. (1), 69–75.
- Bambauer H.U., Eberhard E., Viswanathan K. (1967) The lattice constants and related parameters of plagioclases (low). *Schw. Miner. Petrogr. Mitt. Bd.* **47** (1), 351–364.
- Blasi A., Blasi C. (1994) Aspects of alkali feldspar characterization: prospects and relevance to problems outstanding. *Feldspars and their reactions. NATO ASI series. I. Parsons* (ed.), **421**, 51–101.
- Burnham C.W. (1991) Least-squares refinement **421** of crystallographic lattice parameters for IBM PC/XT/AT and compatibles. Harvard University, Cambridge MA02138, (program description, 24 p.)
- Eberhard E. (1967) Zur synthese der plagioclase. *Schw. Miner. Petrogr. Mitt. Bd.* **47** (1), 385–398.
- Carpenter M.A. (1993) Subsolidus phase relations of the plagioclase feldspar solid solution. *Feldspars and their reactions. NATO ASI series. I. Parsons* (ed.), **421**, 221–269.
- Cathelineau M., Neiva D. (1985) A chlorite solid solution geothermometer. The Los Azufres (Mexico) geothermal system. *Contrib. Mineral. Petrol.* **91**, 235–244.
- Chichagov A.V. (1994) Information-calculating system on crystal structure data of minerals (MYNCRYST). Materials Science Forum, vols 166–169. *Trans. Tech. Publications. Switzerland*. 187–192.
- Dujon S.-C., Lagache M. (1984) Echanges entre plagioclases et solutions aqueuses de chlorures sodiques a differentes pression et temperatures (400 a 800 C, 1 a 3 kilobars) *Bull. miner.*, **107** (3–4), 553–569.
- Kroll H., Muller W.F. (1980) X-ray and electron-optical investigations of synthetic high-temperature plagioclases. *Phys. Chem. Minerals*. **5**, 255–277.
- Kroll H., Kotelnikov A.R., Goettlicher J., Valyashko T.V. (1995) (K, Sr)- feldspar solid solutions: the volume behavior of heterovalent feldspars. *Eur. J. Mineral.*, **7**, 489–499.
- Martin R.F. The hydrothermal synthesis of low albite. (1969) *Contrib. Mineral. Petrol.* **23**, 323–339.

Mason R.A. (1979) The ordering behavior of albite in aqueous solutions at 1 kbar. *Contrib. Mineral. Petrol.* **68**, 269–273.

McKenzie W.S. (1957) The crystalline modification of $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$. *Amer. J. Sci.* **255** (7), 481–516.

Nekvasil H. (1993) Ternary feldspar/melt equilibria: a review. *Feldspars and their reactions*. NATO ASI series. I. Parsons (ed.). **421**, 195–220.

Smith J.V. Phase relations of plagioclase feldspars. (1984) *Feldspars and Feldspathoids* (NATO ASI Series C137).

Brown W.L. (ed.). *Reidel, Dordrecht*, 55–94.

Условные обозначения

a, b, c — параметры (длины сторон) элементарной ячейки, [Å]

α , β , γ — параметры (углы) элементарной ячейки, [°]

C(–1) — пространственная группа (структурный тип) альбита

$\Delta 131$ — межугловое расстояние рентгеновских отражений 131 и 1–31

Cu-K $\alpha 1$ — рентгеновское излучение трубки с медным анодом

λ — длина волны [Å]

P — давление, кбар

T — температура, °C

Индексы минералов

Ab — альбит, Cb — карбонат, Chl — хлорит, Fsp — полевой шпат, Ksp — калиевый полевой шпат, Qz — кварц

STRUCTURAL ORDERING OF FELDSPARS AS AN INDIKATOR OF THE TEMPERATURE OF MINERALOGENESIS

A. R. Kotelnikov^{a, *}, T. I. Shchekina^b, N. I. Suk^{a, **}, Z. A. Kotelnikova^c, T. V. Antonovskaya^d

^aKorzhinskii Institute of Experimental Mineralogy RAS (IEM RAS), Acad. Osipyan street, 4, Chernogolovka, Moscow district, 142432 Russia

^bMoscow State University (MSU), Geol. faculty, Leninskie gory, 1, Moscow, 119991 Russia

^cInstitute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, RAS (IGEM RAS), Staromonetny st., 35, Moscow, 119017 Russia

^dYushkin Institute of Geology RAS (IG Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences), Pervomaiskaya st., 54, Syktyvkar, Republic of Komi, 167982 Russia

*e-mail: kotelnik1950@yandex.ru; **e-mail: sukni@iem.ac.ru

The processes of albite ordering in the range of low temperatures 500–150°C at a pressure of 0.5–1 kbar in alkaline solutions of sodium hydroxide with an excess of silica have been experimentally studied. Based on the data of our experiments and literature data on the ordering of albites and felsic plagioclases, dependences have been derived that make it possible to estimate the temperature from the degree of their structural ordering. The temperatures for plagioclase-bearing parageneses of various natural complexes of the greenschist facies of metamorphism have been determined.

Keywords: feldspars, experimental study, structural ordering, mineral thermometers