

УДК (549.1+551.22):552.321(571.651)

В.И.АЛЕКСЕЕВ, канд. геол.-минерал. наук, доцент, wia59@mail.ru
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

V.I.ALEKSEEV, PhDr. g.-m. Sci., Assistant Professor, wia59@mail.ru
Saint-Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ТЕРМОБАРИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ГРАНИТОВ СЕВЕРНОГО МАССИВА (ЧУКОТКА) ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ШПАТОВ

С помощью методики И.Е.Каменцева и Н.Д.Сорокина исследована зависимость Al-Si-упорядоченности и структур распада щелочных полевых шпатов из различных гранитов Северного массива (Чукотка) от термобарических условий их кристаллизации. Впервые для региона количественно определены значения температуры и давления в гранитной системе в период начала упорядочения полевых шпатов.

Выявлено прогрессивное изменение давления, которое на позднем этапе формирования литий-фтористых гранитов превышает литостатическую нагрузку на 750 МПа. Выдвинуто предположение о возможности обнаружения на Чукотке месторождений типа взрывных рудоносных брекчий.

Сделан вывод о возможности распространения на процессы редкометального магматизма идеи В.С.Соболева – Н.Л.Добрецова о сверхдавлении.

Ключевые слова: гранит, полевой шпат, термобарические условия, сверхдавление, Чукотка.

THERMOBARIC GRANITE CRYSTALLIZATION CONDITIONS OF THE SEVERNIIY MASSIF (THE CHUKOTKA) IN ACCORDANCE WITH THE FELDSPARS STUDY DATA

The Kamentsev I.E. and Sorokin N.D. method is used to investigate the dependence of Al-Si-ordering and structure of alkaline feldspars decomposition in different granites from the Severnyy massif (Chukotka) under thermobaric conditions of their crystallization. The temperature and pressure on the granite system in the initial period of feldspars ordering are determined quantitatively for the first time for the region.

Progressive pressure change which exceeds lithostatic load by 750 MPa at the late stage of lithium-fluoride granites formation is revealed. It is hypothesized that the deposits similar to explosive ore-bearing breccia can be discovered in the Chukotka.

The conclusion on possibility to apply the Sobolev-Dobretsov concept of superpressure to interpret the process of rare-metal magmatism is drawn.

Key words: granite, feldspar, crystallization conditions, superpressure, the Chukotka.

Введение. Современная оценка перспектив рудоносности районов гранитоидного магматизма требует глубокого изучения их геологической истории, построения пространственно-временных моделей рудно-магматических объектов. На помощь металлогении приходят минералогия и петрология, позволяющие выяснять и количественно оценивать условия формирования рудоносных гранитов. В данной статье изложены результаты исследований типоморфизма щелочных полевых шпатов, которые направлены на оценку термобарических условий кристаллизации гранитов.

Объектом исследования явился Северный гранитный массив, расположенный в Шелагской гряде Чукотского нагорья, в районе Чаунской губы. Этот интрузив, сопровождаемый многочисленными оловорудными проявлениями, имеет три особенности. Во-первых, тело главной фазы, сложенное крупнозернистыми биотитовыми гранитами, на разных гипсометрических уровнях пронизано пластообразными телами порфировидных гранитов (далее в тексте – «биотитовые гранит-порфиры») мощностью до 100 м и протяженностью до 5 км [6]. Многоэтажный характер распределения дополнительной фазы и нерезкие лежачие контакты залежей позволили выдвинуть гипотезу о ритмичной расслоенности плутона [15]. Во-вторых, в сводовой части плутона наблюдаются многочисленные относительно маломощные силлы микроклин-альбитовых гранитов и дайки онгонитоподобных микрогранит-порфиров с циннвальдитом и топазом, приуроченные к контактам биотитовых гранитов и гранит-порфиров (далее в тексте – «циннвальдитовые граниты и гранит-порфиры»). В-третьих, широкое латеральное распространение и субгоризонтальное залегание циннвальдитовых гранитов обусловили развитие во вмещающих гранитах слабых метасоматических изменений фации цвиттеров (5-15 % новообразованных кварца, топаза, протолитионита) [1]. Масштабная грейзенизация биотитовых гранитов существенно исказила их исходный геохимический облик и

послужила причиной появления еще одной нестандартной гипотезы о принадлежности этих гранитов, выходящих на поверхность на площади более 250 км², к литий-фтористому геохимическому типу [5]. Подчеркнем, что главные черты Северного массива – псевдорасслоенность и широкое площадное развитие вторичных литионитовых «лейкогранитов» – являются следствием пространственного совмещения и чередования по вертикали залежей нормальных биотитовых и поздних циннвальдитовых гранитов.

Исходные данные. Биотитовые граниты и гранит-порфиры, из которых в основном состоит Северный массив, сложены высоким микроклин-пертитом, обогащенным альбитовым миналом и содержащим до 12 % альбитовых вростков. Его моноклинная упорядоченность t_1-t_2 колеблется в пределах 0,62-0,76, а триклинная упорядоченность t_10-t_1m составляет в гранитах в среднем 0,69 и снижается в гранит-порфирах до 0,52. Вкрапленники биотитовых гранитоидов представлены высоким ортоклаз-пертитом и низким санидином с триклинной упорядоченностью, изменяющейся от 0,00 до 0,29. Они являются наиболее крайними пертитовыми разностями, содержащими до 20 % альбитовых вростков (табл.1).

Циннвальдитовые граниты и гранит-порфиры сложены существенно калиевым промежуточным микроклином с триклинной упорядоченностью $t_10-t_1m = 0,74 \pm 0,83$. Высокие триклинные ортоклаз-пертиты вкрапленников в циннвальдитовых гранитоидах отличаются относительно низкой упорядоченностью ($t_10-t_1m = 0,30 \pm 0,52$), превосходящей, тем не менее, упорядоченность ортоклазовых вкрапленников в биотитовых гранитах (табл.1). Полевые шпаты циннвальдитовых гранитов отличаются от полевых шпатов биотитовых гранитов высокой упорядоченностью, повышенным содержанием ортоклазового минала, слабым развитием пертитовых сростаний и решетчатым двойникованием [2].

Упорядоченность и состав щелочных полевых шпатов из гранитов Северного плутона [2]

№ п/п	Группа однофазных пород	Содержание Al в [SiO ₄]			Молярная доля Ог, %	Альбитовые вросстки	
		t ₁₀	t _{1m}	t ₂₀ = t _{2m}		Объем, %	Размер, мкм
1	Биотитовые граниты:						
	В	0,47	0,37	0,08	73,4	14	8,60
	ОМ	0,77	0,07	0,08	79,7	7	13,30
2	Биотитовые гранит-порфиры:						
	В	0,47	0,36	0,09	73,6	10	9,60
	ОМ	0,68	0,16	0,08	80,6	6	14,50
3	Циннвальдитовые граниты:						
	В	0,58	0,20	0,11	74,3	7	6,00
	ОМ	0,83	0,03	0,07	89,2	5	11,50
4	Циннвальдитовые гранит-порфиры:						
	В	0,65	0,13	0,11	73,2	3	0,50
	ОМ	0,81	0,07	0,07	92,4	3	4,00

Примечание. Нумерация строк соответствует последовательности образования гранитов. В – вкрапленники, ОМ – основная масса.

Методика исследований. Условия образования гранитов Северного массива были исследованы с помощью методики И.Е.Каменцева и Н.Д.Сорокина, основанной на моделях процессов распада твердого раствора и Al-Si-упорядочения полевых шпатов [7, 8, 11]. Базовые модели разработаны для сухих условий равномерного охлаждения щелочных полевых шпатов в области больших значений температуры (более 500 °С), когда Al-Si-упорядочение и распад осуществляются путем взаимодиффузии соответственно алюминия – кремния и калия – натрия. Содержание Al в позиции t₁ (C_i) отклоняется от начального равновесного (C₀) в зависимости от температуры начала упорядочения (T₀), давления (P) и скорости остывания (g) полевых шпатов:

$$C_i = C_0 \exp \left[\frac{K_0 RT_0^2}{(Q - P\Delta V)g} \exp \left(-\frac{Q - P\Delta V}{RT_0} \right) \right], \quad (1)$$

где K₀ – постоянная упорядочения; Q и ΔV – энергия и удельный объем активации упорядочения.

В предложенной модели равновесная упорядоченность оценивается с использованием экспериментальных данных:

$$C_0 = 0,897 - 0,00033T_0 - 0,0041Ab, \quad (2)$$

где Ab – содержание альбитового минала.

Скорость остывания полевых шпатов определяется, исходя из начальной температуры распада (T_p) и размера альбитовых ламелей (λ) в пертитах [7]:

$$g = \frac{K^2 2\pi RT_p^2}{4\lambda^2 Q_p} \exp \left(-\frac{2Q_p}{RT_p} \right), \quad (3)$$

где K – постоянная распада; Q_p – энергия активации распада.

Величины K₀, K, Q, Q_p, ΔV – являются постоянными, зависящими от состава полевого шпата [11].

Таким образом, наблюдаемая упорядоченность полевого шпата определяется термобарическими условиями кристаллизации и составом полевого шпата. Подставляя в формулы (2), (3) значения переменных Ab, T_p, λ, а затем в формулу (1) – вычисленные значения C₀, g и экспериментально определенную величину упорядоченности C_i, можно определить соответствующие значения температуры начала упорядочения полевого шпата и давления на расплав.

Результаты расчетов. Полученные значения начальной температуры упорядочения полевых шпатов (T₀), вероятно, близки к

значениям температуры кристаллизации материнских гранитов и с учетом литостатического давления 50 МПа, соответствующего глубине становления Северного плутона 1,2-1,8 км, составляют около 640 и 605 °С соответственно для биотитовых и циннвальдитовых гранитов. Однако при этом неестественным представляется сходство температуры кристаллизации разных фаз биотитовых гранитов, а также близость и даже некоторое увеличение значений T_0 при переходе от ранних циннвальдитовых гранитов к поздним гранит-порфирам (табл. 2). Такие результаты противоречат существующим представлениям о снижении температуры кристаллизации последовательных интрузивных фаз [3, 12, 13], в том числе и данным о температуре кристаллизации полевых шпатов в гранитах [4, 10, 14]. Объяснить это какими-либо термодинамическими особенностями кристаллизации поздних фаз, например выделением теплоты скрытой кристаллизации минералов или теплоты вязкого течения расплава, невозможно, так как главные особенности состава и условия транспортировки расплава принципиально не изменяются.

Наиболее вероятной причиной наблюдаемого противоречия является неверное предположение о соответствии давления расплава нагрузке вышележащих пород. Важным отличием гранитов поздних фаз и литий-фтористых гранитов в особенности является высокая водонасыщенность расплавов, обогащенность летучими компонентами. В биотитовых гранит-порфирах содержание фтора достигает 0,38 %, бора – 0,0087 %, в циннвальдитовых микрогранит-порфирах – соответственно 0,65 и 0,0076 %. Следовательно, в расчетах необходимо учитывать давление, оказываемое на расплав флюидом. Уже для биотитовых гранитов дополнительной фазы следует предполагать давление кристаллизации, повышенное относительно литостатического на 150 МПа. Но самые интересные результаты получены при оценке давления, сопровождающего кристаллизацию литий-фтористых гранитов (табл.2). Расчеты показывают, что микроклин циннвальдитовых гранитов кристаллизуется в интервале температур от 660 до 590 °С под давлением 500 МПа, а при формировании жильных онгонитов давление возрастает до 800 МПа. Таким образом, в истории формирования Се-

Таблица 2

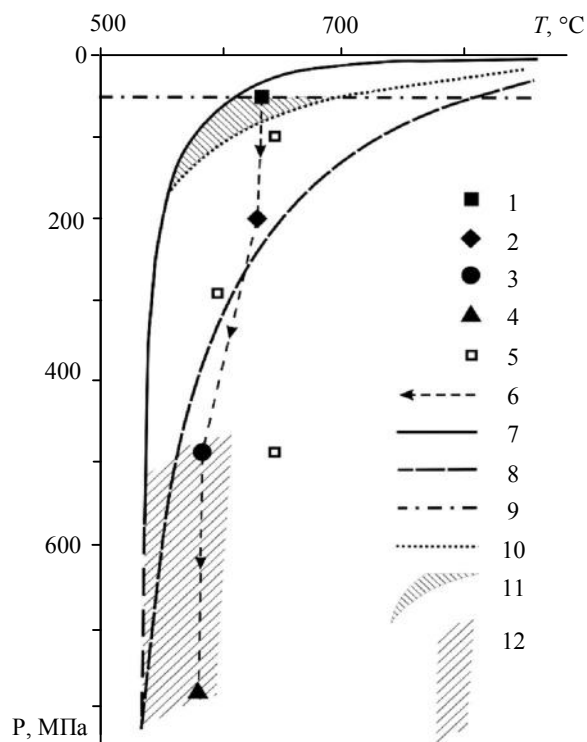
Температура начала упорядочения щелочных полевых шпатов из гранитов Северного плутона при различном давлении

№ п/п	Группа однофазных пород	Температура начала расплава (T_p), °С	Содержание Al в позиции t_1 (С _i)	Температура начала упорядочения (T_0 , °С) при различном давлении, МПа			
				50	200	500	800
1	Биотитовые граниты:						
	В	580	0,84	674			
	ОМ	510	0,84	639			
2	Биотитовые гранит-порфиры:						
	В	570	0,83	672	666		
	ОМ	500	0,84	640	635		
3	Циннвальдитовые граниты:						
	В	570	0,78	675		658	
	ОМ	400	0,87	604		588	
4	Циннвальдитовые гранит-порфиры:						
	В	565	0,78	674			644
	ОМ	390	0,88	610			584

Примечание. Жирным шрифтом указаны значения температуры, соответствующие прогрессивному режиму изменения давления флюида.

верного гранитного плутона зафиксировано нарастание давления, которое на позднем этапе магматизма, в ходе формирования литий-фтористых гранитов, превышает литостатическую нагрузку на $800 - 50 = 750$ МПа (см. рисунок).

Обсуждение результатов. Рассчитанные параметры кристаллизации гранитов Северного массива согласуются с современными представлениями [9]. И.А.Загрузина [6] оценивала температуру кристаллизации гранитов Северного массива в $580-590$ °С. Что касается данных о магматическом давлении, то еще Г.А.Валуй [4] указала на возможность кристаллизации полевых шпатов гранитовых аплитов и пегматитов при давлении до 500 МПа (см. рисунок). Ф.Г.Рейф



Термобарические условия кристаллизации гранитов Северного массива по данным изучения полевых шпатов

1-4 – расчетные условия кристаллизации гранитов: 1 – биотитовых гранитов, 2 – биотитовых гранит-порфиров, 3 – циннвальдитовых гранитов, 4 – циннвальдитовых гранит-порфиров; 5 – условия кристаллизации полевых шпатов из гранитов по [4]; 6 – эволюция условий кристаллизации во времени; 7, 8 – линии солидуса эвтектического гранита при содержании фтора 2 % (7) и при избытке воды (8); 9 – давление нагрузки вышележащих пород; 10 – линия начала интенсивной декомпрессионной кристаллизации магмы при подъеме; 11, 12 – области кристаллизации литий-фтористых гранитов в нормальных условиях (11) и в Северном массиве (12)

[13] по результатам изучения флюидных включений в редкометальных гранитах Забайкалья и Казахстана оценивает флюидное давление в 360-620 МПа. При этом он указывал на повышение растворимости воды во фторсодержащих расплавах, что может способствовать возрастанию флюидной нагрузки на поздних стадиях развития магматической системы. Высокобарический режим кристаллизации литий-фтористых гранитов предполагал В.И.Коваленко [9].

Приведенные результаты доказывают возможность распространения на процессы редкометального магматизма идеи В.С.Соболева – Н.Л.Добрецова о существовании сверхдавления – давления, превышающего в ходе порообразования нагрузку перекрывающих толщ. Не обсуждая детально причины появления магматического сверхдавления, отметим, что оно, безусловно, связано с быстрым подъемом расплава, насыщенного летучими компонентами, на малые глубины и субзихорической кристаллизацией последнего в слабопроницаемой толще биотитовых гранитов. Одним из доказательств реальности этого явления служат многочисленные примеры протоклаза, зафиксированные в литий-фтористых гранитах. Но главным свидетельством специфического режима кристаллизации таких гранитов является широчайшее развитие слабых пневматолитовых изменений – альбитизации и грейзенизации, изменивших первичные состав и облик биотитовых гранитов в сводовой части плутона [1]. Причиной этих изменений явилась фильтрация флюидов по всему объему вмещающих пород, сопровождавшая высокобарическую дегазацию редкометальных расплавов. Металлогеническим следствием такого режима кристаллизации гранитов стало рассеяние грейзеново-рудной минерализации и отсутствие в Северном массиве рудопроявлений соответствующего формационного типа. Учитывая малую глубину и высокие значения давления кристаллизации магмы и флюидоотделения, можно предполагать возможность обнаружения в Чаун-Чукотском регионе месторождений типа взрывчатых рудоносных брекчий.

В заключение отметим, что использованная методика И.Е.Каменцева с соавтора-

ми позволяет оценить баротермические условия упорядочения щелочных полевых шпатов лишь в самом приближенном виде. Базовая модель упорядочения не учитывает флуктуаций режима остывания и влияние изоморфных примесей в полевых шпатах. В расчетах не учтена зависимость положения сольвуса от давления и упорядоченности полевых шпатов. Остается открытым вопрос о каталитической роли воды в процессе перераспределения в кристаллической решетке полевых шпатов алюминия и натрия. Тем не менее, приведенные данные позволяют оценить термобарические условия кристаллизации полевых шпатов.

Таким образом, впервые для Центральной Чукотки количественно определены значения температуры и давления в гранитоидной магматической системе. Выявлены закономерное увеличение давления и проявление флюидного сверхдавления на поздних стадиях развития системы, в ходе кристаллизации литий-фтористых гранитов Северного массива. Выдвинуто предположение о возможности обнаружения на Чукотке месторождений типа эксплозивных рудоносных брекчий. Сделан вывод о возможности распространения на процессы редкометального магматизма идеи В.С.Соболева – Н.Л.Добрецова о сверхдавлении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев В.И. О происхождении литий-фтористых гранитов Северного массива (Чукотка) // Записки РМО. 2005. Ч.134. № 6. С. 19-30.
2. Алексеев В.И. Эволюция упорядоченности и состава щелочных полевых шпатов Северного гранитного массива (Чукотка) / В.И.Алексеев, Н.Г.Соколова // Записки РМО. 2007. Ч.136. № 2. С.62-74.
3. Бескин С.М. Редкометальные гранитовые формации / С.М.Бескин, В.Н.Ларин, Ю.Б.Марин. Л.: Недра, 1979. 280 с.
4. Валуй Г.А. Полевые шпаты и условия кристаллизации гранитоидов (Прибрежная зона Приморья). М.: Наука, 1979. 148 с.
5. Дудкин Д.В. Литий-фтористые граниты Чукотки и их геохимические особенности / Д.В.Дудкин, С.В.Ефремов, В.Д.Козлов // Геохимия. 1994. № 3. С. 393-402.
6. Загрузина И.А. Позднемезозойские гранитоиды восточного побережья Чаунской губы // Тр. СВКНИИ. Вып. 12. Магадан, 1965. С. 4-140.

7. Каменцев И.Е. Оценка скоростей субсолидусного остывания щелочных полевых шпатов по результатам исследования структур распада / И.Е.Каменцев, Н.Д.Сорокин // Геохимия. 1988. № 10. С.1468-1478.

8. Каменцев И.Е. Оценка скорости остывания по результатам исследования щелочных полевых шпатов / И.Е.Каменцев, Н.Д.Сорокин // Минер. журн. 1990. № 6. С. 25-35.

9. Коваленко В.И. Гранитоидные рудообразующие системы // Эндогенные источники рудного вещества. М.: Наука, 1987. С. 59-80.

10. Кумеев С.С. Полевые шпаты – петрогенетические индикаторы. М.: Недра, 1982. 208 с.

11. Оценка скорости остывания и температуры начала процесса Al-Si упорядочения щелочных полевых шпатов пегматитов мусковитовой формации по их кристаллохимическим особенностям / И.Е.Каменцев, Н.Д.Сорокин, Д.Ю.Попов и др // Записки ВМО. 1995. Ч. 124. № 5. С.111-119.

12. Принципы расчленения и картирования гранитоидных интрузий и выделения петролого-металлогенических вариантов гранитоидных серий. Методические рекомендации / Авторы-составители: Г.Л. Добрецов, Ю.Б. Марин, С.М. Бескин, С.А. Лесков; ВСЕГЕИ. СПб. 2006. 57 с.

13. Рейф Ф.Г. Рудообразующий потенциал гранитов и условия его реализации. М.: Наука, 1990. 181 с.

14. Сырицо Л.Ф. Мезозойские гранитоиды Восточного Забайкалья и проблемы редкометального рудообразования. СПб: Изд-во СПбГУ, 2002. 360 с.

15. Тиблюв И.В. Особенности геологического развития Севера Чукотки с позиций термодинамической парадигмы эндогенных процессов / СВНИЦ; СВКНИИ ДВО РАН. Магадан 2005. 304 с.

REFERENCES

1. Alekseev V.I. About the origin of lithium-fluoric granites of the Severny massif (the Chukotka) // Zapiski RMO, 2005. № 6, pp. 19-30. (in Russian).
2. Alekseev V.I., Sokolova N.G. Evolution of ordering and composition of alkaline feldspars in the Severny granite massif (Chukotka) // Zapiski RMO, 2007. № 2, pp. 62-74. (in Russian).
3. Beskin S.M., Larin V.N., Marin Y.B. Rare-metal granite formations. L.: Nedra, 1979. 280 p. (in Russian).
4. Valuj G.A. Feldspars and granitoid crystallization conditions (coastal zone of the Primorye). M.: Nauka, 1979. 148 p. (in Russian).
5. Dudkinskij D.V., Efremov S.V., Kozlov V.D. Lithium-fluoric granites of the Chukotka and their geochemical features // Geochemistry. 1994. № 3, pp. 393-402. (in Russian).
6. Zagruzina I.A. The Late Mesozoic granitoids of the east coast of the Chaun bay // Tr. SVKNII. № 12. Magadan, 1965, pp. 4-140. (in Russian).
7. Kamentsev I.E., Sorokin N.D. Estimation of sub-solidus cooling rate of alkaline feldspars from the exsolution textures studying // Geochemistry. 1988. № 10, pp.1468-1478. (in Russian).
8. Kamentsev I.E., Sorokin N.D. Cooling rate estimation from alkaline feldspars studying. // Miner. J. 1990. № 6. P. 25-35. (in Russian).

9. *Kovalenko V.I.* Granitoid ore-forming systems / Endogenetic sources of ore substance. M: Nauka, 1987, pp. 59-80.
10. *Kumeev S.S.* Feldspars as petrogenetic indicators. M: Nedra, 1982, 208 p. (in Russian).
11. *Kamentsev I.E., Sorokin N.D., Popov D.Y.* Estimation of cooling rate and alkaline feldspar Al-Si-ordering temperature in the muscovite pegmatite formation by their crystal-chemical features // *Zapiski RMO*, 1995. № 5, pp. 111-119. (in Russian).
12. Principles of division and mapping of granitoid plutons and recognition of petrological and metallogenic variants of the granitoid series. Methodical recommendations / Authors-composers: G.L.Dobretsov, Y.B.Marin, S.M.Beskin, S.A.Leskov. VSFGEI SPb. 2006. 57 p. (in Russian).
13. *Reif F.G.* Ore-forming potential of granites and conditions of its realisation. M: Nauka, 1990. 181 p. (in Russian).
14. *Syritso L.F.* Mesozoic granitoids of East Transbaikalia and a problem of rare-metal ore formation. SPb.: St.Petersburg State University, 2002. 360 p. (in Russian).
15. *Tybilov I.V.* Peculiarities of geological development of the North Chukotka from the position of a thermodynamic paradigm of endogenic processes. Magadan: SVNC; SVKNII DVO RAN, 2005. 304 p. (in Russian).