

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПОРОДНОЙ ГЕОТЕРМОБАРОМЕТРИИ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ  
МАГМАТИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД****Юрченко Ю.Ю., Ладыгина М.Ю., Беляев Г.М.**Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург,  
yuri\_yurchenko@vsegei.ru, georgy83@yandex.ru

Проблема миграции химических элементов в термобароградиентных полях, т.е. под влиянием вариаций таких интенсивных термодинамических факторов, как температура и давление, а следовательно, неоднородности состава горных, прежде всего эндогенных пород имеет многовековую историю, в которой наиболее яркими вехами являются споры плутонистов и нептунистов о геологической роли магматических процессов, адептов изо- и аллохимического метаморфизма, участников «гранитной дискуссии» – ортомагматистов и трансформистов.

К настоящему времени исследователями разных стран выполнен огромный объем работ по экспериментальному моделированию природных геологических процессов и теоретическому осмыслению полученных результатов. Эксперименты проведены в широком диапазоне температур и давлений, и с неоспоримостью показали зависимость состава горных пород от вариаций этих термодинамических параметров. Практическим результатом экспериментов явилась разработка разнообразных минеральных геотермометров и геобарометров, основанных на согласованном поведении петрогенных и малых элементов в процессах петро- и рудогенеза.

Эти петрогеохимические показатели имеют важное значение для оценки физических условий образования различных типов горных пород, в первую очередь магматического генезиса. Вместе с тем результаты экспериментального моделирования геологических процессов дают лишь мозаичную картину поведения петрогенных и малых элементов в термобароградиентных полях. Полученные таким способом оценки Р-Т условий привязаны к локальным, избранным точкам геологического пространства, охарактеризованным одним (реже несколькими) штурфами горной породы. Поэтому были предприняты попытки получить более широкое, объемно-плоскостное представление о распределении химических элементов в логически обоснованных или экспериментально смоделированных Р-Т полях.

В первом случае изучалось распределение элементов в вертикальных сечениях (разрезах) гранитных массивов, проявленных в горноскладчатых областях и вскрытых эрозией на большую глубину. Предполагалось, что для гипсометрически более низких горизонтов интрузивов характерны более высокие значения, по крайней мере, литостатического давления. Такого рода исследования были проведены на примере гранитных массивов Эльджуртинского на Северном Кавказе [9], Раумид, Гиссарского, Лянгарского и других на Памире [3, 10, 17], Жаман-Койтасского в Северном Казахстане [6] и др. Указанные исследователи не пришли к однозначному выводу. Однако, Ф.Г. Рейфом и др. [12], изучившими термометрически расплавные включения в кварце вкрапленников, было установлено, что температура кристаллизации эльджуртинского гранита понижается с уменьшением абсолютных высотных отметок от +2102 м до -1321 м в интервале 995-740<sup>0</sup>С, чему отвечает возрастание содержания ряда микроэлементов (Li, Rb, Cs и другие).

Примеры экспериментального изучения поведения элементов в термоградиентных полях немногочисленны. Так, например, А.Н. Дударевым с соавторами [5] был проведен эксперимент по нагреванию крупного блока (30х10х10 м) лессов до 700<sup>0</sup>С при градиентах от 0,5 до 3<sup>0</sup>С на 1 см. В результате, установлено, что в термоградиентных полях рудные и породообразующие элементы закономерно перераспределяются и образуют свои зоны обогащения – К и Fe тяготеют к источникам локального нагревания, а Si, Ca, Na отгоняются в более холодные части системы.

Широкие возможности получения информации о поведении химических элементов в объемном термобароградиентном пространстве открывают методы так называемой «породной геотермобарометрии». Основой методов являются теоретические представления японского петролога А. Миаширо, согласно которому химический состав пород определяется физическими условиями их образования [18]. Эти представления были разработаны на данных изучения метаморфических пород высоких ступеней. В принципе, А. Миаширо не сказал ничего нового, так как представления о зависимости химического состава метаморфических пород от физических условий их образования в разных формах категоричности отражены в трудах крупнейших петрологов разных стран – Дж. Седерхольма, У. Грубенмана, В.М. Гольдшмидта, Ц.Е. Тилли, П. Эскола, П. Ниггли, Д.С. Коржинского, Г. Рамберга, Н.Л. Боуэна, О.Ф. Таттла и многих других. В заслугу А. Миаширо можно поставить только четкость, лаконичность формулировки идеи, которая позднее под названием «принципа Миаширо» была распространена, помимо метаморфических пород, на ультраметаморфические и магматические образования [2].

Первую попытку реализации идеи о связи химического состава пород с физическими условиями их образования предпринял И.В. Давиденко [4], который статистически обработал данные О. Таттла и Н. Боуэна [21] по экспериментальному изучению гаплогранитной системы. В результате были рассчитаны уравнения множественной и

двумерной регрессии, поставившие химический состав гранитных выплавов в зависимость от общего давления (в барах) в системе, равного парциальному давлению воды. Эти уравнения имеют следующий вид:

$$P_{H_2O} (\text{кб}) = 17077 - 399SiO_2 + 1076Al_2O_3 + 275Na_2O + 399K_2O, \text{ мас.}\% \quad (1)$$

$$P_{H_2O} (\text{кб}) = 1654Na_2O - 4732, \text{ мас.}\% \quad (2)$$

Применение этих уравнений к природным объектам показало, что получаются два ряда несходящихся значений  $P_{H_2O}$ . Эмпирически было установлено, что расчетные значения давления по уравнению (1) соответствуют общему, или литостатическому, давлению, а по уравнению (2) – собственно парциальному давлению воды [2].

Для оценки температуры образования гранитоидных пород были использованы экспериментальные данные Х. Штуля [19] по плавлению парагнейса в интервале температур 690-850°C при  $P_{\text{общ}} = P_{H_2O} = 2$  кб. Х. Штулем были определены химические составы шести выплавов, изменение состава которых (мас.%) в зависимости от температуры выражаются уравнением множественной регрессии следующего вида [2]:

$$T^{\circ}C = 6798 - 59,37SiO_2 - 29,87Al_2O_3 - 108,08CaO - 223,35Na_2O - 29,27K_2O, \text{ мас.}\% \quad (3)$$

Применение уравнений (1-3) к представительным выборкам химических анализов конкретных комплексов гранитоидов разных районов и генетических типов показало хорошее соответствие рассчитанных значений  $P$  и  $T$  с оценками этих параметров, полученных другими методами и другими исследователями. Существенные расхождения имели место только в оценке температуры образования гранитоидов, так как по уравнению (3) определяются условия зарождения (выплавления) гранитной магмы, а не ее кристаллизации. Рассчитанные значения  $T^{\circ}C$  нередко превышали 1000-1100°C, что противоречило многим экспериментальным данным. Однако опыты по изучению расплавных включений в породообразующих минералах гранитоидов подняли оценки температуры до 1200°C и более и сняли указанное выше противоречие. Скорее всего, по мнению Д.И. Фрих-Хара с соавторами [16], в стеклах «заморожены» ассоциации химических элементов, возникшие на ранних стадиях эволюции магматических расплавов.

Показательно, что высокие (до 1100°C) значения температуры образования гранитных магм дают и оценки по уравнению, рассчитанному Р. Томасом [20]:

$$T^{\circ}C = 6,7(MgO + CaO) - 5,0(SiO_2 + Al_2O_3 + Na_2O + K_2O) + 1441, \text{ мас.}\% \quad (4)$$

В развитие идеи о связи химического состава магматических пород с физическими условиями их образования авторами разработана система породных геотермобарометров применительно к породам основного-ультраосновного состава. На основе сводки Б.И. Малюка и Н.А. Арестовой [7] экспериментальных данных по расплавам базальтового состава (Малюк, Арестова, 1988) рассчитаны следующие уравнения множественной регрессии:

$$Pл (\text{кб}) = 79 - 1,09SiO_2 - 0,48Al_2O_3 - 0,3FeO - 0,16MgO - 0,12Na_2O, \text{ мас.}\% \quad (5)$$

$$Pл (\text{кб}) = 116 - 1,48SiO_2 + 0,31MgO - 3,04CaO - 0,34Na_2O, \text{ мас.}\% \quad (6)$$

$$T^{\circ}C = -678 + 20SiO_2 + 36FeO - 163MnO + 26MgO + 29CaO + 34Na_2O, \text{ мас.}\% \quad (7)$$

$$T^{\circ}C = 1647 - 9SiO_2 - 161MnO - 21MgO - 11CaO, \text{ мас.}\% \quad (8)$$

С помощью уравнений (5)-(8) рассчитаны  $P$ - $T$  условия формирования следующих геологических образований:

1) Базиты и ультрабазиты расслоенного Скергаардского интрузива (петрохимические данные Л.Уэйджера и Г.Брауна [15]).

Расчетные данные авторов:  $P(5) = 13,8 - 23,1$  кб,  $P(6) = 10,8 - 21,0$  кб,  $T(7) = 1156 - 1455^{\circ}C$ .

Другие оценки [11]:  $T = 1220 - 1420^{\circ}C$  (оптимум 1230-1260°C).

2) Коматииты Балтийского щита (петрохимические данные Н.А. Арестовой [1]).

Расчетные данные авторов:  $P(5) = 16 - 19$  кб,  $P(6) = 31 - 51$  кб,  $T(7) = 1450 - 1600^{\circ}C$ ,  $T(8) = 1660 - 1870^{\circ}C$ .

Другие оценки [13]:  $T = 1734 \pm 62^{\circ}C$ ,  $P = 70 - 80$  кб.

3) Кимберлиты Терского берега Кольского полуострова (петрохимические данные М.М. Калинкина [8]).

Расчетные данные авторов:  $P(5) = 32 - 41$  кб,  $P(6) = 42 - 46$  кб,  $T(7) = 890 - 980^{\circ}C$ ,  $T(8) = 1700 - 1790^{\circ}C$ .

Другие оценки [14]:  $T = 740 - 800^{\circ}C$ ,  $P = 30 - 35$  кб.

Сравнительный анализ приведенных данных показывает, что для оценки  $P$ - $T$  параметров формирования базитов более пригодны уравнения (5) и (7), ультрабазитов – (6) и (8).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Арестова Н.А. Эволюция базит-ультрабазитового магматизма Балтийского щита интервала 3,4-2,4 млрд. лет. Докторская диссертация. СПб, 2004.
2. Беляев Г.М., Рудник В.А. Формационно-генетические типы гранитоидов. Л.: Недра, 1978.
3. Гаврилин Р.Д. и др. Первичное распределение редких элементов семейства железа в вертикальном разрезе верхней части гранитного интрузива // ДАН СССР, 1975, т.223, №3.
4. Давиденко И.В. Использование петрохимии для восстановления условий при магнообразовании. – В кн.: Вопросы петрохимии. Л., 1969.
5. Дударев А.Н. и др. Мобилизация рудных элементов в термоградиентных полях // Тр. инст. геол. и геоф., 1976, вып. 291.

6. Елисеева О.П., Викторов В.В. Изменение состава гранитоидов Жаман-Койтасского массива в зависимости от глубины залегания подошвы массива // Изв. АН СССР, сер. геол., 1972, №4.
7. Зеленокаменные пояса фундамента Восточно-Европейской платформы. Л., Наука, 1988.
8. Калинин М.М. и др. Кимберлиты и родственные породы Кольского региона // Петрология, 1993, т.1, №2.
9. Ляхович В.В. Распределение Li, Cs, Be и F в вертикальном разрезе Эльджуртинского массива порфиридных гранитов (Северный Кавказ) // Геохимия, 1977, №3.
10. Могаровский В.В., Мельниченко А.К. Распределение петрогенных и редких элементов в вертикальном разрезе роговообманково-биотитовых гранитов Гиссарского плутона // ДАН ТаджССР, 1969, т.12, №8.
11. Никольский Н.С. Термодинамика минеральных равновесий базитов. М., Наука, 1978.
12. Рейф Ф.Г. и др. О механизме образования остаточных очагов высоководного гранитного расплава // ДАН СССР, 1990, т. 314, №5.
13. Смолькин В.Ф. и др. Фациальные особенности коматиитов Кольского региона, их метаморфизм и условия генерации первичных расплавов // Мат-лы конф. «Рифтогенез, магматизм, металлогения докембрия. Корреляция геологических комплексов Фенноскандии». Петрозаводск, 1999.
14. Ульянов А.Г. Тепловые режимы районов щелочно-ультраосновного магматизма Северо-Запада России: реконструкция на основе метода иономинеральной клинопироксеновой термобарометрии // Мат-лы конф. «Рифтогенез, магматизм, металлогения докембрия. Корреляция геологических комплексов Фенноскандии». Петрозаводск, 1999.
15. Уэйджер Л., Браун Г. Расслоенные изверженные породы. М., Мир, 1970.
16. Фрих-Хар Д.И. и др. О неоднородности природных стекол // Изв. АН СССР, сер. геол., 1988, №5.
17. Хасанов Р.Х., Козырев В.И. О вертикальной петрохимической зональности Джаманшурского интрузива гранодиоритов (Юго-Восточный Памир) // ДАН ТаджССР, 1975, т.18, №5.
18. Miyashiro A. Chemical composition of rocks in relation to metamorphic facies // Japan. J. Geol. Geogr., 1967, Vol. 38, № 2-4.
19. Stheul H.H. Die experimentelle Metamorphose und Anatexis eines Parabiolitgneises aus dem Schwarzwald // Chem. Erde, 1962, Bd. 21, Hft. 3-4.
20. Thomas R. Abschätzung der Bildungstemperatur magmatischer Schmelzen // Z. Geol. Wiss., 1990, Bd. 18, Hft.1.
21. Tuttle O.F., Bowen N.L. Origin of granite in the light experimental studies in the system  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{KAlSi}_3\text{O}_8 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$  // Geol. Soc. Amer., Mem., 1958, Vol 74.