

2. Николаев Г.С., Арискин А.А. Бураковско-Аганозерский расслоенный массив Заонежья: II. Строение краевой группы и оценка состава родоначальной магмы методом геохимической термометрии // Геохимия. 2005. № 7. С. 712-732.

3. Ariskin A.A., Nikolaev G.S. An empirical model for the calculation of spinel-melt equilibrium in mafic igneous systems at atmospheric pressure: I. Chromian spinels // Contrib. Mineral. Petrol. 1996. V. 123. P. 282-292.

## **РЕКОНСТРУКЦИЯ СОСТАВА РОДОНАЧАЛЬНОЙ МАГМЫ БУРАКОВСКО-АГАНОЗЕРСКОГО РАССЛОЕННОГО МАССИВА ЗАОНЕЖЬЯ МЕТОДОМ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ТЕРМОМЕТРИИ**

**Николаев Г.С., Арискин А.А.**

*Институт геохимии и аналитической химии РАН, Москва, Россия  
e-mail: gsnikolaev@rambler.ru, ariskin@rambler.ru*

## **RECONSTRUCTION OF THE PARENTAL MAGMA COMPOSITION OF THE BURAKOVO-AGANAZERO LAYERED MASSIF IN THE TRANS-ONEGA AREA BY GEOCHEMICAL THERMOMETRY TECHNIQUES**

**Nikolaev G.S., Ariskin A.A.**

*Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia  
e-mail: gsnikolaev@rambler.ru, ariskin@rambler.ru*

By means of numerical simulation of the equilibrium crystallization of the compositions of marginal-series rocks by the COMAGMAT-3.0 computer program, the temperature was estimated at slightly higher than 1300°C, and the composition of parental melt was reconstructed. The parental melt was chemically close to the volcanics of the Vetreny Belt, which provides additional arguments in favor of the comagmatic character of these rocks.

Оценка состава родоначальной магмы плутона может быть получена несколькими способами: (1) за искомый состав принимается состав закаленных пород эндоконтактной фации интрузива; (2) оценка проводится по средневзвешенному составу пород интрузива или его расслоенной серии; (3) способ, который получил название метода геохимической термометрии [3], позволяет получить оценку температуры и состава жидкой части исходной магмы по результатам ЭВМ-моделирования равновесной кристаллизации составов, отвечающих наименее фракционированным (примитивным) породам краевых серий [1].

В силу чрезвычайно слабой обнаженности массива, поиск неизменных недифференцированных пород эндоконтакта, представляется трудноразрешимой задачей. Оценка среднего состава плутона может быть произведена двумя путями. Первый включает определение средних составов разных типов пород с последующим расчетом средневзвешенного в соответствии с их распространенностью [4]. Реалистичность подобных оценок сильно зависит от принятой модели геологического строения интрузива. Другой подход основан на расчете средневзвешенных содержаний элементов по сводному вертикальному разрезу интрузива [5]. Такой подход показал свою эффективность для относительно небольших пластовых тел и пологих лопполитов. Однако для крупных плутонов сложной геометрической формы встает вопрос о соответствии реальных объемов пород и их соотношений в частных разрезах, что требует независимой проверки. Кроме того, серьезным ограничением этой методики является условие доступности полного разреза расслоенной серии, представляющего всю совокупность дифференциатов исходной магмы.

Метод геохимической термометрии включает проведение термодинамического моделирования равновесной кристаллизации систем, отвечающих реальным образцам пород, т.е. не связан с ограничениями, которые может накладывать сложное пространственное строение массива. В основе метода лежит предположение, что в пространственно сближенных объемах куму-

лата первичный (исходный) интеркумулятивный расплав имел одинаковую температуру и состав. Реализация геохимической термометрии проводилась с помощью ЭВМ-модели COMAGMAT-3.0 [1]. Анализ составов модельных расплавов при одних и тех же значениях температур позволяет найти области сгущения и пересечения эволюционных линий. При этом среднее значение для температурного интервала пересечений линий эволюции состава жидкости рассматривается как температура исходной расплавно-кристаллической смеси, а «равновесный» состав минералов принимается в качестве первичного (исходного). Состав жидкости, находящейся в равновесии с первичными кристаллами, определяет исходный расплав – в том смысле, что он соответствует состоянию смеси до того, как в ней пройдут процессы докристаллизации. Ранее этот подход использовался при реконструкции температурно-композиционных и фазовых характеристик исходных магм для силлов Сибирской платформы и Восточной Камчатки [1, 6], контрастно слоенные массивы Партридж Ривер и Талнах, а также крупные плутоны Скергаард, Киглапейт и Довырен [2]. Успех применения геохимической термометрии к этим объектам связан с котектической природой исходных магм, которые во всех случаях представляли смеси кристаллов оливина, плагиоклаза и жидкости.

Важнейшим петрологическим параметром, накладывающим ограничения на физико-химические характеристики родоначальной магмы, является состав интрателлурических вкрапленников. Около половины объема Бураковско-Аганозерского плутона составляют оливиновые кумулаты и адкумулаты, поэтому фазовый состав внедрившейся магмы устанавливается однозначно: родоначальный расплав и интрателлурические кристаллы Ol. Топология линий эволюции состава расплава в поле избыточного компонента такова, что при практических расчетах (в силу аналитических и вычислительных неопределенностей) модельные траектории образуют не пересечение, а систему субпараллельных линий, которые накладываются друг на друга, образуя «полосообразный» тренд эволюции в координатах температура – состав. Это осложняет интерпретацию результатов моделирования, требуя привлечения дополнительной и независимой от расчетов информации о составе первичных кристаллов Ol, которые используются для конкретизации температуры внедрения исходной магмы. Наиболее надежной оценкой состава интрателлурических вкрапленников Бураковско-Аганозерского плутона следует признать наиболее магнезиальные составы, установленные в краевой группе пород, которые для обоих блоков плутона отвечают Fo<sub>87</sub>.

Краевая группа плутона характеризуется широким набором дифференциатов и, как следствие, большим диапазоном вариаций содержаний петрогенных компонентов. Для целей геохимической термометрии главный интерес представляют дуниты и пойкилитовые перидотиты как наименее дифференцированные. Эти породы содержат от 25 до 45 мас.% MgO и при близких значениях магнезиальности характеризуются значительным разбросом содержаний FeO, CaO и SiO<sub>2</sub>, что вероятно, связано с неизохимичностью процессов серпентинизации. Поэтому для термометрических расчетов следует выбирать образцы с наименьшими вторичными изменениями: такие породы вскрыты глубокими скважинами 20 и 67. Для последующих вычислений были отобраны 9 составов, представляющих 4 образца из скв. 20 и 5 образцов из скв. 67.

Расчет траекторий равновесной кристаллизации расплавов, исследуемых пород проводился для безводных условий и давления в 6 кбар, которые были приняты на основании геологических данных. Окислительный потенциал соответствовал буферу WM. Методом геохимичес-

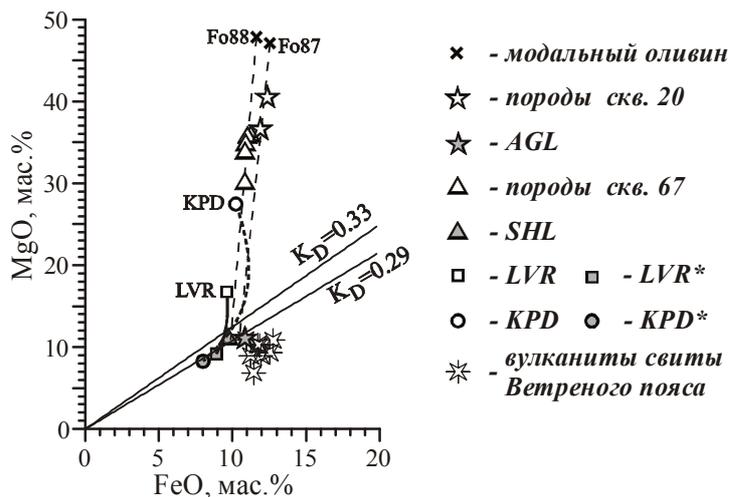


Рис. 1. Сопоставление модельных оценок родоначального расплава Бураковско-Аганозерского плутона с предыдущими оценками и вулканитами Ветреного пояса.

Таблица 1

Оценки состава родоначальной магмы и материнского расплава  
 для Бураковско-Аганозерского плутона (мас. %)

	LVR [4]	KPD [5]	AGL	SHL	LVR*	KPD*
SiO <sub>2</sub>	49.96	47.05	51.36 (±1.00)	54.28 (±1.63)	52.79	53.65
TiO <sub>2</sub>	0.47	0.38	0.70 (±0.15)	0.77 (±0.06)	0.59	0.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.08	7.76	12.58 (±1.02)	12.11 (±0.21)	15.19	15.38
FeO <sub>общ</sub>	9.55	10.24	10.84 (±0.19)	9.74 (±0.30)	8.91	8.00
MnO	0.16	0.14	0.16 (±0.02)	0.16 (±0.04)	0.17	0.15
MgO	16.62	27.46	11.06 (±0.19)	11.27 (±0.57)	9.19	8.28
CaO	7.66	5.13	11.22 (±0.19)	9.50 (±1.05)	9.64	10.17
Na <sub>2</sub> O	2.42	1.51	1.68 (±0.52)	1.67 (±0.31)	3.04	2.99
K <sub>2</sub> O	0.32	0.29	0.36 (±0.24)	0.50 (±0.14)	0.40	0.57
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.03	0.05 (±0.01)	0.05 (±0.02)	0.08	0.06
Fe/Mg	0.58	0.38	0.97	0.87	0.96	0.96
Ca/Al	0.63	0.66	0.90	0.77	0.63	0.66
T <sup>ликв</sup> , °C	–	–	1303 (±18)	1323 (±26)	1281	1250
Fo <sup>ликв</sup> , мол. %	–	–	87.04	88.03	87	87

Примечание. В скобках приведена половина размаха.

кой термометрии для разных блоков получены оценки состава и температуры родоначального расплава (жидкой составляющей материнской магмы), приведенные в табл. 1. По образцам Аганозерского блока получена оценка – AGL, по породам Шалозерского блока – SHL. Оба состава представляют насыщенные SiO<sub>2</sub> магматические расплавы, содержащие около 11 % MgO – их можно характеризовать как высокомагнезиальный базальт (AGL) и/или бонинитоподобный андезитобазальт (SHL).

Реалистичность результатов геохимической термометрии можно очень просто оценить графически, не привлекая данные микронзондовых анализов или результаты моделирования фазовых равновесий. Ранее мы постулировали, что краевые породы представляют смесь интрателлурических кристаллов оливина Fo<sub>87-88</sub> и родоначального расплава. Этот подход основан на условии сохранения баланса масс, в силу которого на вариационных диаграммах продукты смешения двух крайних компонентов будут располагаться вдоль линии, соединяющей их составы. Одним из компонентов является исходный расплав (состав которого заранее не известен), а другим – оливин, в отношении состава которого можно сделать реалистичный прогноз. Действительно, на графиках (рис. 1) фигуративные точки составов исследуемых пород «выстраиваются» в сублинейные тренды, которые «отсекают» на линии составов стехиометрического Ol. Для 4-х образцов из скв. 20 (Аганозерский блок) это пересечение указывает на вероятный состав исходного оливина Fo<sub>86±0.3</sub>. В случае 5-ти образцов из скв. 67 (Шалозерский блок) такой подход дает чуть более магнезиальный состав Fo<sub>88±0.6</sub> (погрешности указаны в равномерной метрике).

Тот факт, что родоначальная магма интрузива находится в равновесии с оливином состава Fo<sub>87-88</sub>, позволяет оценить соотношение FeO и MgO в расплаве. Диапазон возможных вариаций этого соотношения демонстрируют две сплошные линии, показанные в координатах FeO-MgO и отвечающие двум значениям K<sub>D</sub><sup>Fe-Mg</sup> – 0.29 и 0.33. Поэтому пересечение тренда, образуемого фигуративными точками составов этих пород, с линией равновесных соотношений FeO и MgO определяет их содержания в расплаве. Известное содержание MgO дает возможность определить концентрации других элементов на трендах соответствующих графиков. Подобные оценки хорошо согласуются с результатами геохимической термометрии.

Существуют две независимые оценки средневзвешенного состава интрузива, которые отождествлялись с составом родоначальной магмы плутона: оценка М.М. Лаврова [4] и оценка Е.В. Коптева-Дворникова с соавторами [5] (LVR и KPD, соответственно, табл. 1). Для того чтобы привести предшествующие оценки к сопоставимому виду необходимо вычленить «расплавную» составляющую исходной магмы. Для этого были проведены расчеты равновесной кристаллиза-

ции составов LVR и KPD до появления на ликвидусе оливина состава Ro87. Эти вычисления проводились при тех же параметрах, что и расчеты для краевых пород (безводные условия, P = 6 кбар, буфер WM). Составы модельных жидкостей LVR\* и KPD\* приведены в табл. 1. Для появления на ликвидусе Fo<sub>87</sub> составы необходимо закристиллизовать на 19.9 и 49.5 мас.%, соответственно. Обращает внимание близость модельных составов остаточных жидкостей. Различия между ними превышают погрешность силикатного анализа только по содержаниям TiO<sub>2</sub> и K<sub>2</sub>O. Таким образом, обе модели строения плутона практически одинаково отражают состав габброидной части плутона, но по-разному оценивают объем зоны оливиновых кумулатов. В первом случае она составляет 21 об.%, в другом – 53 об.%. По сравнению с нашими оценками [7], основанными на результатах петрофизического моделирования (35-40 об.%) состав LVR представляет заниженную оценку, а состав KPD «завышает» долю зоны оливиновых кумулатов.

Основываясь на структурно-геологическом анализе региона, сходных петрохимических характеристиках пород и близости абсолютных датировок В.С. Куликов [3] выдвинул гипотезу о том, что Бураковско-Аганозерский плутон вместе с эффузивами свиты Ветреного пояса принадлежит к единой магматической формации, являясь их глубинным аналогом. Полученные характеристики родоначального расплава Бураковско-Аганозерского плутона позволяют провести более детальное сопоставление химизма этих образований. Для сравнительного анализа были привлечены наименее магнезиальные (MgO<11%) составы лав, как содержащие минимальное количество интрателлурических вкрапленников оливина. Установлена близость составов родоначального расплава Бураковско-Аганозерского плутона и эффузивов свиты Ветреного пояса по петрогенным и редкоземельным элементам. Это является дополнительным аргументом в пользу гипотезы об их комагматичности.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08-05-00194.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Арискин А.А., Бармина Г.С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: Наука, 2000. 365 с.
2. Арискин А.А., Конников Э.Г., Кислов Е.В. Моделирование равновесной кристаллизации ультрамафитов в приложении к проблемам формирования фазовой расслоенности Довыренского плутона (Северное Прибайкалье, Россия) // Геохимия. 2003. № 2. С. 1-25.
3. Куликов В.С., Бычкова Я.В. и др. Роль глубинной дифференциации в формировании палеопротерозойского лавового плато коматиитовых базальтов Синегорье (Ю.-В. Феноскандия) // Петрология. 2005. № 5. С. 516-537.
4. Лавров М.М. Оливины и пироксены Бураковской расслоенной интрузии // Минералогия магматических и метаморфических пород докембрия Карелии. Петрозаводск: ИГ КарНЦ РАН, 1994. С. 6-41.
5. Николаев Г.С., Коптев-Дворников Е.В., Ганин В.А. и др. Вертикальное строение Бураковско-Аганозерского расслоенного массива и распределение петрогенных элементов в его разрезе // Доклады РАН. 1996. Т. 347. № 6. С. 799-801.
6. Френкель М.Я., Ярошевский А.А., Арискин А.А. и др. Динамика внутрикамерной дифференциации базитовых магм. М.: Наука, 1988. 216 с.
7. Николаев Г.С., Арискин А.А. Бураковско-Аганозерский расслоенный массив Заонежья: II. Строеение краевой группы и оценка состава родоначальной магмы методом геохимической термометрии // Геохимия. 2005. № 7. С. 712-732.