

- Рингвуд А. Е.* Происхождение Земли и Луны. М.: Недра, 1982. 293 с.
- Сафронов В. С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
- Хачай Ю. В., Анфилогов В. Н.* Об условиях и процессе формирования Земли на раннем этапе ее аккумуляции // *Фундаментальные проблемы геотектоники*. Т. II. М., 2007. С. 330–333.
- Brearley A. J., Jones R. H.* Chondrite meteorites // *Rev. Min.*, 1998. Vol. 36. P. 383–391.
- Merk R., Breuer D., Spohn T.* Numerical modeling of  $^{26}\text{Al}$  – Induced radioactive melting of asteroids concerning accretion // *Icarus*, 2002. Vol. 159. P. 183–191.
- Nichols R. H. Jr.* Short lived radionuclides in meteorites: constraints on nebular time scales to the production of solids // *Space Sci. Rev.*, 2000. № 1–2b. P. 113–122.

**В. А. Симонов<sup>1</sup>, В. В. Масленников<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> – *Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск*  
*simonov@uiggm.nsc.ru*

<sup>2</sup> – *Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс*

### **Условия формирования интрузивных комплексов в районах активного действия гидротермальных рудообразующих систем Центральной Атлантики**

В последние годы получен значительный объем новой информации о современных гидротермальных рудообразующих системах в Центральной Атлантике. Развитие гидротермальных процессов обусловлено магматической активностью в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта. Значительная часть расплавов задерживается на глубине, формируя интрузивные габбро-гипербазитовые комплексы. При этом в магматических камерах идет фракционирование расплавов и летучих компонентов, что имеет большое значение для перераспределения и накопления рудных компонентов. В связи с этим, представляет значительный интерес выяснение условий интрузивных магматических систем, действовавших в непосредственной близости с современными гидротермальными полями. Одним из эталонных объектов в Центральной Атлантике, где найдены «черные курильщики» и проведено детальное опробование магматических комплексов, является район трансформного разлома 15°20' [Строение зоны ..., 1989; Богданов, 1997; Симонов и др., 1999 и др.].

Исследования образцов, собранных при непосредственном участии одного из авторов во время 9-го рейса НИС «Антарес» (1990–1991 гг.) и 15-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (1992 г.) [Симонов и др., 1999], позволили выяснить условия формирования интрузивных комплексов в районе разлома 15°20'.

Физико-химические параметры процессов образования интрузивных пород были определены с помощью анализа расплавных и флюидных включений в минералах. Включения исследовались по методике, описанной ранее [Борисенко, 1977; Ермаков, Долгов, 1979; Симонов и др., 2008]. Составы расплавных включений установлены на рентгеновском микроанализаторе «Самебах-миго» (Институт геологии и минералогии СО РАН). Содержания редких, редкоземельных элементов и воды в

расплавных включениях определены методом вторично-ионной масс-спектрометрии на ионном микроанализаторе IMS-4f в Институте микроэлектроники РАН по методике [Соболев, 1996]. Флюидные включения были проанализированы методом LA-ICP-MS (метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерным прободборником) в Университете Тасмании, г. Хобарт (Австралия).

**Интрузивные гипербазиты зоны разлома 15°20'.** Наиболее представительные данные по расплавным включениям получены для перидотитов, содержащих, в отличие от большинства интенсивно серпентинизированных ультрабазитов района разлома 15°20', значительное количество неизмененных зерен оливина, ортопироксена и хромшпинелида.

Первичные расплавные включения размером до 30–50 мкм равномерно располагаются в зернах хромшпинелидов и имеют равновесные округлые формы. По содержанию SiO<sub>2</sub> (42–48.5 мас. %) и MgO (14–21 мас. %) большинство прогретых включений отвечают пикробазальтам и оливиновым базальтам и представляют собой микропорции близких к исходным расплавам, при кристаллизации которых в магматических камерах происходило формирование ультраосновных интрузивных комплексов в зоне трансформного разлома 15°20'.

На вариационных диаграммах Харкера рассмотренные включения в хромшпинелидах в большинстве случаев тесно ассоциируют с высокомагнезиальными габброидами зоны разлома 15°20' и района Сьерра-Леоне в Центральной Атлантике. На диаграмме AFM точки составов включений в хромшпинелидах зоны разлома 15°20' располагаются в поле кумулятов из офиолитовых ассоциаций. По соотношению CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO включения находятся, в основном, между кумулятами основного и ультраосновного составов. Изученные включения обладают невысокой железистостью (FeO/MgO 0.6–0.85) и располагаются фактически на тренде оливиновых кумулятов с характерным снижением роли Al при падении значений FeO/MgO.

По характеру распределения редкоземельных элементов во включениях из хромшпинелидов зоны разлома 15°20' можно выделить два типа расплавок. В одних случаях (для включений с незначительными содержаниями TiO<sub>2</sub>, CaO, Na<sub>2</sub>O) значения РЗЭ минимальны и наблюдается положительный наклон графиков с ростом роли тяжелых лантаноидов. В другом случае (для относительно обогащенных TiO<sub>2</sub>, CaO, Na<sub>2</sub>O) спектры РЗЭ имеют отрицательный наклон с накоплением легких лантаноидов относительно тяжелых, и в этом они похожи на данные для базальтов срединно-океанических хребтов типа E-MORB.

Расчетное моделирование по программе PETROLOG [Danyushevsky, 2001] на основе данных по составу расплавных включений в хромшпинелидах позволило оценить температуры кристаллизации минералов из перидотитов района разлома 15°20': оливин – 1360 °С, ортопироксен – 1315 °С, хромит – 1215 °С. Реальность подобных температур подтверждается соответствием расчетных и полученных с помощью микрозонда составов всех трех минералов.

**Габброиды зоны разлома 15°20'.** Проведены исследования включений минералообразующих сред в минералах из образцов габброидов, отобранных в непосредственной близости от гидротермального поля Логачев. Большой интерес представляют флюидные включения в плагиоклазе и кварце из мелко-среднезернистых габбро, габбро-долеритов и долеритов, так как они представляют собой микропорции флюидонасыщенных систем, образующихся в процессах эволюции расплавок в интрузивных камерах.

Наиболее детально были изучены флюидные включения в кварце габбро-долеритов и долеритов, сформировавшем как отдельные зерна в матрице породы, так и целые прожилки. Десятки первичных флюидных включений (размерами 5–60 мкм) в кварце располагаются равномерно в зерне, часто имеют правильную гексагональную форму и ориентированы в одном направлении. По фазовому составу можно выделить двухфазовые (газ + жидкость) и многофазовые (газ + жидкость + кристаллические фазы) включения. Среди твердых фаз преобладают кристаллики кубической формы (NaCl), реже присутствуют другие более мелкие кристаллические образования. Судя по фазовому составу этих включений, мы имеем дело с многокомпонентными высококонцентрированными флюидными системами.

Криометрические исследования двухфазовых флюидных включений в кварце дали возможность выделить три интервала температур эвтектик:  $-33 \div -35$ ,  $-36 \div -38$  и  $-54.5 \div -55$  °С. С учетом преобладания натрия в морской воде и в океанических гидротермах, эти температуры наиболее близки эвтектикам [Борисенко, 1977] соответственно следующих трехкомпонентных водно-солевых систем: NaCl–MgCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O, NaCl–FeCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O и NaCl–CaCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O. Было установлено, что температуры плавления последних кристаллических фаз различаются для включений, содержащих разные водно-солевые системы:  $-5.5 \div -14.5$  °С для растворов состава NaCl–MgCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O,  $-4.8 \div -8.3$  °С для растворов с содержанием FeCl<sub>2</sub> и  $-28.5 \div -35.0$  °С в случае NaCl–CaCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O. Используя эти данные, с помощью трехкомпонентных диаграмм [Борисенко, 1977] были определены концентрации солей в растворах включений различного состава (мас. %): 9–18 (NaCl–MgCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O), 8–12 (NaCl–FeCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O) и 25–27 (NaCl–CaCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O). В целом, выделяются три группы включений с концентрациями солей (мас. %): 8–12, 13–18 и 25–27. В первой группе присутствуют соли Na, Mg, Fe, во второй – Na, Mg и в третьей – Na, Ca.

Температуры гомогенизации двухфазовых флюидных включений в кварце различаются в зависимости от состава растворов: 302–356 °С (NaCl–MgCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O), 294–302 °С (NaCl–FeCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O) и 310–320 °С (NaCl–CaCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O). Вводя поправки на давление (400 бар соответственно по 15 и 25 мас. % системам NaCl–H<sub>2</sub>O), получаем следующие температуры гидротермальных процессов: 340–395, 335–345 и 345–355 °С соответственно.

Термометрические исследования многофазовых включений в кварце показали, что частичные гомогенизации (газа в жидкость) происходят при температурах 205–310 °С. Полные гомогенизации (растворение последних кристаллических солевых фаз) наблюдаются в интервале температур 297–405 °С. По диаграмме фазового равновесия системы NaCl–H<sub>2</sub>O концентрации солей в растворах этих включений достигают 38–48 мас. %. Зная температуры частичных и полных (наиболее близких к реальным температурам минералообразования) гомогенизаций, мы можем оценить давление в гидротермальных системах [Леммлейн, 1973], которое варьирует в интервале 510–960 бар, что значительно превышает влияние столба воды (около 400 бар) и свидетельствует о кристаллизации кварца в эндогенных условиях.

В целом, термометрические и криометрические исследования позволили установить общие характеристики растворов во включениях в кварце из интрузивных пород зоны разлома 15°20'. В то же время, несомненный интерес и большое значение имеют содержания в растворах других более редких элементов, включая и рудные компоненты. С этой целью ряд индивидуальных флюидных включений в кварце из

габбро-долеритов и долеритов проанализирован с помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерным пробоотборником (LA-ICP-MS).

С помощью этого метода анализируется валовый состав вещества, выжженного в результате воздействия лазера на кварц, поэтому, прежде всего, необходимо установить принадлежность установленных концентраций отдельных компонентов собственно растворам включений, а не матрице минерала-хозяина. Помощь в данном случае могут оказать графики зависимости интенсивности сигнала химического элемента от времени анализа. Полученные спектры показывают, в большинстве случаев, на ровном фоне минимальных характеристик кварцевой матрицы резкие пики соединений Na, K, Mg, Ca, Cl и реже Fe, что явно связано с вскрытием флюидного включения под действием лазера. Преобладание этих элементов убедительно подтверждает результаты криометрических исследований.

Из более редких элементов характерны пики Sr и Ba. Часто присутствуют в растворах включений рудные компоненты – Cu, Pb, Zn. В единичных случаях установлено наличие золота и серебра. Анализ многофазных включений, содержащих кроме жидкости еще и кристаллические солевые фазы, показал наряду с обычными компонентами присутствие целого ряда редких элементов: Te, As, Mo, Sb, Tl, V, Rb, Bi.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 08-05-00180, 09-05-00295) и Интеграционного проекта совместных исследований СО–УрО РАН (№ 98), Программы Президиума РАН №17.

### Литература

*Богданов Ю. А.* Гидротермальные рудопроявления рифтов Срединно-Атлантического хребта. М.: Научный мир, 1997. 167 с.

*Борисенко А. С.* Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика, 1977. № 8. С. 16–27.

*Ермаков Н. П., Долгов Ю. А.* Термобарогеохимия. М.: Недра, 1979. 271 с.

*Леммлейн Г. Г.* Морфология и генезис кристаллов. М.: Наука, 1973. 328 с.

*Симонов В. А., Колобов В. Ю., Пейве А. А.* Петрология и геохимия геодинамических процессов в Центральной Атлантике. Новосибирск: СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. 224 с.

*Симонов В. А., Шарков Е. В., Ковязин С. В., Бортников Н. С.* Расплавные включения в хромшпинелидах из Fe-Ti интрузивных комплексов Центральной Атлантики: ключ к познанию физико-химических параметров гидротермально-магматических систем медленно-спрединговых океанических хребтов // ДАН, 2008. Т. 418. № 5. С. 679–682.

*Соболев А. В.* Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрологической информации // Петрология, 1996. Т. 4. № 3. С. 228–239.

Строение зоны разлома Зеленого Мыса: Центральная Атлантика. Труды ГИН, вып. 439 / Под ред. Ю. М. Пуцаровского. М.: Наука, 1989. 199 с.

*Шарков Е. В., Абрамов С. С., Симонов В. А. и др.* Гидротермальные изменения и сульфидная минерализация в габброидах впадины Маркова (Срединно-Атлантический хребет, 6° с.ш.) // Геология рудных месторождений, 2007. Т. 49. № 6. С. 535–558.

*Danyushevsky L. V.* The effect of small amounts of H<sub>2</sub>O on crystallisation of mid-ocean ridge and backarc basin magmas // J. Volcan. Geoth. Res., 2001. Vol. 110. № 3–4. P. 265–280.