

## Гранитные магмы как источник фтора при формировании флюоритовых месторождений (Хомрат-Акарем, Египет)

Бабанский А.Д., Рябчиков И.Д., Соловова И.П.

*ИГЕМ РАН, baban@igem.ru*

## Granite magmas as sources of fluorine in fluorite deposits

### (Homrat Akarem, Egypt)

Babansky A.D., Ryabchikov I.D., Solovova I.P.

*IGEM RAS, baban@igem.ru*

**Summary.** Based on the results of investigations of crystalline, melt and fluid inclusions in quartz from the Homrat Akarem granite (Egypt), the mechanisms and forms of F fixation in melts and fluids are considered. The thermodynamic conditions of topaz and fluorite stability are estimated. A model is proposed for the formation of fluorite deposits genetically related to magmatic processes.

**Введение.** Пространственная сопряженность гранитных массивов и гидротермальных жильных флюоритовых месторождений дает основание предполагать их генетическую связь. Однако большой разрыв между температурами солидуса кислых магм и параметрами кристаллизации флюоритовых проявлений создает определенные трудности. Эта дилемма усугубляется высоким коэффициентом распределения F в расплав, что резко ограничивает его переход во флюид. С целью решения этой проблемы были изучены граниты Хомрат-Акарем, Египет, и развитое в районе распространения этих гранитов гидротермальное флюоритовое месторождение.

**Гранит.** Основные порообразующие минералы гранита включают альбит, калиевый полевой шпат, слюды (биотит, мусковит) и кварц, насыщенный включениями различного типа. *Кристаллические* включения представлены биотитом, мусковитом, альбитом, флюоритом, топазом и цирконом. *Расплавные* включения полностью раскристаллизованы, среди дочерних фаз, дополнительно к перечисленным кристаллическим, присутствует кварц. Высокие содержания в расплавах летучих компонентов нашло отражение в образовании вокруг включений ореолов из небольших флюидных включений (потери в процессе декомпрессии).

**Термометрия и составы включений.** *Расплавные включения.* Из-за высокого содержания летучих компонентов эксперименты с расплавными включениями проводились в газовом аппарате высокого давления при 600°C, 0.3 ГПа и 700°C, 0.3 ГПа. Гомогенизация включений наблюдалась при 700°C, 0.3 ГПа. Химические составы стекол отвечают глиноземистым гранитам S-типа и характеризуются высокими концентрациями F (0.48 мас.%) и низким содержанием Cl (F/Cl = 16). *Флюиды включений.* В герметичных расплавных включениях в интерстициях между дочерними минералами присутствует жидкая фаза, гомогенизирующаяся в жидкость при 108°C. Были оценены: концентрация раствора (4 мас.% экв. NaCl), плотность (0.99 г/см<sup>3</sup>) и давление при 550°C (0.8 ГПа). Флюидные включения из ореолов частичной декрепитации с постоянным соотношением раствор/газ гомогенизируются в жидкость при 150-200°C. При солёности раствора 1-5 мас.% экв. NaCl их плотность составляет 0.91-0.96 г/см<sup>3</sup> и при 550°C давление не превышает 0.6-0.7 ГПа. При изучении включений было установлено, что заполняющий их раствор обычно относится к NaCl типу. Однако встречены включения, температура эвтектики которых позволяет предположить присутствие в растворе фторидного компонента (T эвт. = -5°C).

*Содержание H<sub>2</sub>O в исходных расплавах.* Используя объёмные соотношения дочерних фаз во включениях, размеры флюидных обособлений внутри включений и в ореолах

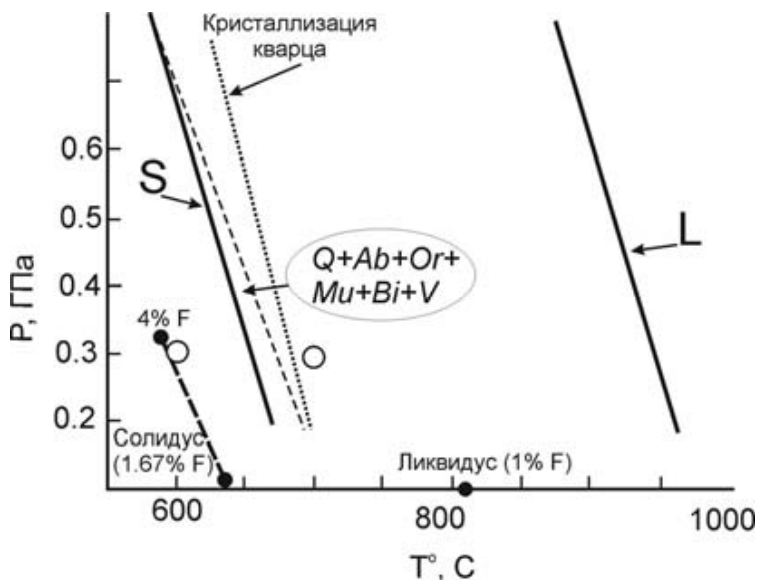


Рис. 1. Влияние F на смещение линий ликвидуса и солидуса в системе гранит – H<sub>2</sub>O-HF по экспериментальным данным. Пустые кружки – наши определения. S – солидус, L – ликвидус.  
 Fig. 1. Influence of F on the position of solidus and liquidus lines in the system granite–H<sub>2</sub>O–HF according to experimental data. Our determinations are shown by unfilled circles. S – solidus, L– liquidus.

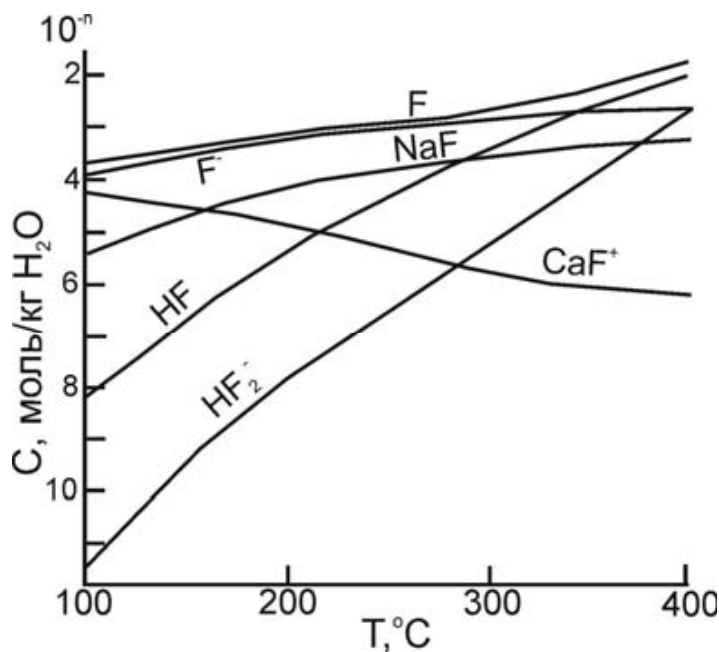


Рис. 2. Температурная зависимость концентрации (C) ионов фтора и его различных соединений в водном флюиде с низким содержанием хлора, равновесном с минеральной ассоциацией кварц + плагиоклаз (X<sub>An</sub> = 0.005) + калиевый полевой шпат + мусковит + флюорит.  
 Fig. 2. Temperature dependence of the concentrations of F<sup>-</sup> (C) and various F compounds in an aqueous fluid with low Cl content in equilibrium with the mineral assemblage quartz + plagioclase (X<sub>An</sub> = 0.005) + potassium feldspar+ muscovite + fluorite.

вокруг них, концентрация воды в расплаве оценена в 9–10 мас.%. Экспериментально установлено (Naney, 1983), что при 0.8 ГПа такие гранитные магмы способны растворить до 10–11 мас.% H<sub>2</sub>O. Таким образом, кристаллизующиеся расплавы находились в условиях, близких к насыщению летучими компонентами.

**Влияние F на температуры ликвидуса и солидуса гранитной системы.** В экспериментах с расплавленными включениями было установлено, что при 600°C и 0.3 ГПа происходит полное плавление всех дочерних фаз, включая кварц, т.е. температура солидуса должна быть еще ниже. В гранитной системе, насыщенной F–H<sub>2</sub>O, (рис. 1) присутствие F снижает температуру ликвидуса примерно на 150°C, а кристаллизация кварца в экспериментах при 0.3 ГПа начинается при 700°C. Температура гомогенизации включений в кварце близка к экспериментальным данным, однако температура солидуса оказывается значительно ниже – 500–550°C.

**Позднемагматический этап эволюции гранитной магмы** был зафиксирован сингенетичными включениями солевого расплава (до 80 об.% кристаллических фаз) и флюидными включениями H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub> в поздних вкрапленниках кварца. Среди дочерних фаз солевого включения диагностированы карбонат и изотропные кристаллы, плавление которых происходит в интервале температур 160–450°C, гомогенизация включения – при 500–550°C. Давление, оцененное по результатам изучения флюидных включений, отвечает 0.4–0.5 ГПа.

**Термодинамический анализ равновесия флюида с фторсодержащими минеральными парагенезисами.** Расчет проводился с использованием компьютерной программы GBFLOW. На рис.2 показана температурная зависимость концентраций различных ионов и соединений фтора в водном флюиде с низким содержанием Cl и равновесном с минеральной ассоциацией кварц + плагиоклаз ( $X_{An} = 0.005$ ) + калиевый полевой шпат + мусковит + флюорит. При температурах ниже 300°C преобладающей формой фтора во флюидной фазе является ион F<sup>-</sup>, который при более высоких температурах сменяется на HF. Расчеты показывают, что при сравнительно низких температурах в низкохлоридном растворе в ассоциацию кварц, низкокальциевый плагиоклаз, микроклин и мусковит входит флюорит, который при температуре выше 350°C становится неустойчивым и сменяется топазом (рис. 3) согласно реакции  $2KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + CaF_2 + 3SiO_2 = CaAl_2Si_2O_8 + 2KAlSi_3O_8 + Al_2SiO_4F_2 + 2H_2O$ . В присутствии биотита поле стабильности флюорита значительно расширяется, а увеличение вариантности системы в целом приводит к возможности равновесного сосуществования флюорита и топаза в определенном интервале температур. Фиксация F в граните начинается на магматической стадии в форме топаза и продолжается в таком виде, вероятно, до температуры порядка 400°C. Это вытекает из находок топаза среди кристаллических включений в кварце и результатам термодинамических расчетов (рис. 2, 3). Снижение температуры сдвигает реакцию влево, что приводит к замене топаза на флюорит. При этом топаз сохраняется в виде кристаллических включений в кварце.

**Механизм фиксации F в гидротермальных жилах в виде флюорита.** Фиксация фтора в граните начинается на магматической стадии в форме топаза и продолжается в таком виде, вероятно, до температуры порядка 400°C. Снижение температуры сдвигает

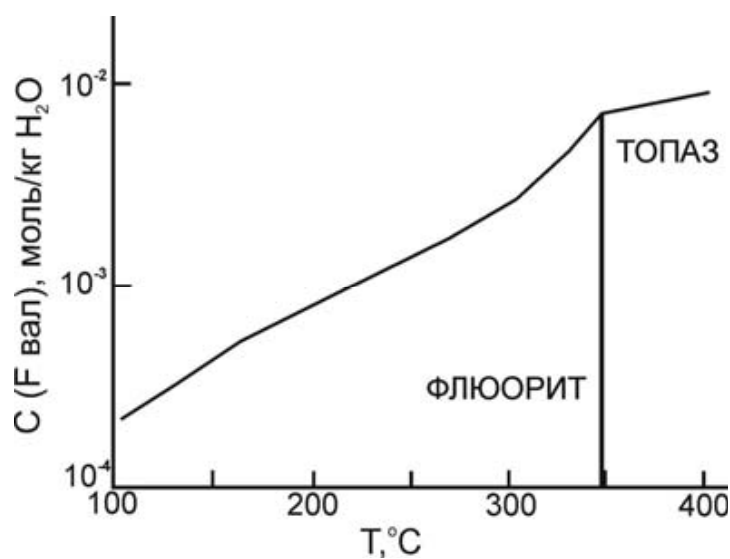


Рис. 3. Температурная зависимость валового содержания фтора, C (F вал), в низкохлоридном флюиде, взаимодействующем с минеральной ассоциацией кварц + низкокальциевый плагиоклаз + микроклин + мусковит в присутствии либо флюорита, либо топаза.

Fig. 3. Temperature dependence of bulk F content in Cl-poor fluid interacting with the mineral assemblage quartz+ low-Ca

реакцию влево, что приводит к замене топаза на флюорит, который появляется в парагенетической ассоциации автотермальных образований. При этом в виде кристаллических включений и дочернего минерала расплавных включений в кварце топаз сохраняется. Однако, из-за низкого химического потенциала кальция в остаточных магмах гранитного состава (обусловленного содержанием CaO в полевых шпатах) связь флюоритовой минерализации исключительно с магматическим источником весьма проблематична. Более вероятен механизм смешения низкотемпературных поровых растворов с повышенным содержанием кальция с горячими флюидами магматического генезиса.

## Литература

Naney M.T. Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems // Am. J. Sci. 1983. V. 283. P. 993–1033.