

Рингвуд А.Е. Состав и петрология мантии Земли. М.: Недра, 1981. 584 с.

Рябчиков И.Д. Содержание цинка в хлоридных растворах, равновесных с минералами гранитоидов в условиях повышенных температур и давлений // Доклады АН СССР. 1970. Т. 194. № 6. С. 1418–1420.

Фролова Т.И., Бурикова И.А. Магматические формации современных геотектонических обстановок. М.: МГУ, 1997. 320 с.

Шарапов В.Н., Акимцев В.А., Доровский В.Н., Перепечко Ю.В., Черепанов А.Н. Динамика развития рудно-магматических систем зон спрединга. Новосибирск: НИЦ ОИГТМ, 2000. 405 с.

**В.А. Симонов<sup>1, 2, 3</sup>, А.В. Котляров<sup>1, 3</sup>**

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

<sup>2</sup> – *Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет, г. Новосибирск*

<sup>3</sup> – *Казанский федеральный университет, г. Казань*

### **Физико-химические параметры кристаллизации минералов из магматических комплексов, вмещающих колчеданные месторождения Урала и Сибири**

Хорошо известна тесная связь колчеданных месторождений Урала и Сибири с базальт-риолитовыми толщами, при этом обращают на себя внимание контрастные составы пород, входящих в эти комплексы. Данные особенности вмещающих сульфидные руды магматических ассоциаций могут быть следствием целого ряда процессов, крайними вариантами которых можно предположить либо совершенно случайное совмещение базальтоидных и гранитоидных магм, либо развитие этих контрастных расплавов из единого глубинного источника. Большую помощь в решении проблем магмогенеза могут оказать исследования расплавных включений, несущих прямую информацию о магматических системах, из которых кристаллизовались минералы вмещающих колчеданные месторождения Сибири и Урала базальтовых толщ. В частности, нами были изучены расплавные включения в клинопироксене из базальтов месторождений Кызыл-Таштыг в Южной Сибири [Симонов, Котляров, 2019] и Валенторского на Северном Урале [Симонов и др., 2009; Симонов, Масленников, 2018]. Дальнейшие исследования магматических процессов при формировании этих месторождений проводились с широким использованием расчетного моделирования на основе данных по расплавным включениям.

Необходимо отметить, что колчеданное месторождение Кызыл-Таштыг (Восточная Тува) располагается среди нижнекембрийских вулканогенных пород, представленных преимущественно базальтовыми лавами и реже базальтовыми и андезитовыми брекчиями. Большую роль играет комплекс, сложенный дацитовыми порфиритами, перемежающимися с базальтовыми и андезибазальтовыми порфиритами, туфами и сланцами [Зайков, 2006].

Рудные тела Валенторского месторождения (Северный Урал) находятся в тесной ассоциации с силурийским риолит-базальтовым комплексом. В разрезе месторождения

выделяются подушечные базальты, диабазы, гиалокластиты, яшмы и силициты; андезиты и дациты (с колчеданными залежами), а также надрудные риодациты [Медноколчеданные..., 1988; Масленников, 2006].

В целом, геологические данные по рассмотренным месторождениям свидетельствуют о связи базальт-риолитового магматизма и сульфидных руд не только пространственно, но и генетически. В связи с этим, представляется интересным выяснение условий магматических систем, действовавших в непосредственной близости и практически одновременно с формированием Кызыл-Таштыгского и Валенторского месторождений.

Основное внимание при выяснении физико-химических условий формирования магматических комплексов месторождений Кызыл-Таштыг и Валенторское уделялось изучению расплавных включений в минералах. Экспериментальные исследования включений позволили установить температуры и составы расплавов, из которых кристаллизовались клинопироксены и кварц из базальт-риолитового комплекса [Симонов и др., 2009; Симонов, Котляров, 2016; Симонов, Масленников, 2018; Симонов, Котляров, 2019].

Расчетное моделирование с помощью программ PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] и WinPLtb [Yavuz, Yildirim, 2018] на основе данных по расплавным включениям и составам клинопироксенов позволило не только установить параметры минералообразующих процессов, но и рассмотреть особенности эволюции магматических систем на месторождении Кызыл-Таштыг при их подъеме и кристаллизации минералов в последовательной серии нескольких промежуточных разноглубинных камер: 24–16 км (1215–1145 °С), 15–6 км (1234–1140 °С) и от 4.5 км до близповерхностных условий (1210–1105 °С) [Симонов, Котляров, 2019].

Подобные расчеты с использованием информации по расплавным включениям показали, что клинопироксены из базальтоидов Валенторского месторождения начали образовываться на тех же глубинах (около 25 км), что и пироксены из эффузивов месторождения Кызыл-Таштыг (24 км) [Симонов, Масленников, 2018]. Глубины основной кристаллизации пироксенов обоих месторождений сопоставимы и частично перекрываются: 20–12 км, 10–3 км (Валенторское); 24–6 км, около и менее 4.5 км (Кызыл-Таштыг).

В последнее время на основе данных о глубинах кристаллизации клинопироксенов, отмеченных выше, были рассмотрены особенности эволюции магматических систем месторождений Кызыл-Таштыг и Валенторское. Расчетное моделирование проводилось по программе COMAGMAT [Ariskin, Barmina, 2004] с использованием составов прогретых и гомогенизированных расплавных включений в клинопироксене. Моделировалась равновесная декомпрессионная кристаллизация. Для месторождения Кызыл-Таштыг были рассмотрены две ситуации, соответствующие составу включений с максимумами MgO (10.18 мас. %) и SiO<sub>2</sub> (55.26 мас. %), начиная с давлений 8 и 6 кбар (отвечающих нижней и верхней частям наиболее глубокой магматической камеры, соответственно [Симонов, Котляров, 2019]). Содержание H<sub>2</sub>O составляет 0.5 мас. % при буфере QFM. Для Валенторского месторождения рассмотрена ситуация, отвечающая составу включения с максимумом MgO (6.14 мас. %) при значительном содержании SiO<sub>2</sub> (55.19 мас. %), начиная с давления 6 кбар, соответствующего наиболее глубокой магматической камере [Симонов, Масленников, 2018]). Содержание H<sub>2</sub>O составляет 0.5 мас. % при буфере QFM.

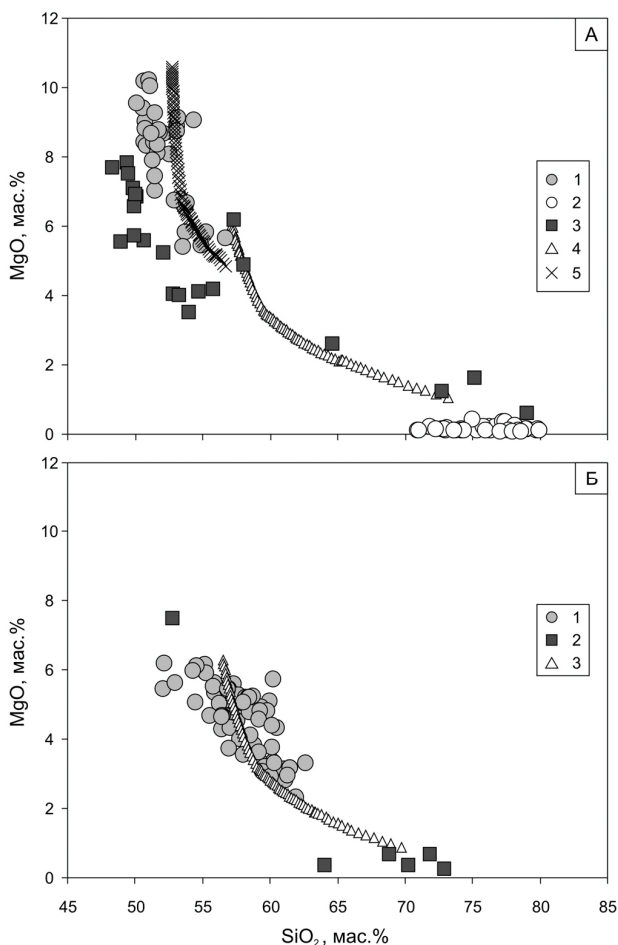


Рис. Условия кристаллизации минералов из базальтриолитовых комплексов Кызыл-Таштыгского (а) и Валенторского (б) колчеданных месторождений:

а – расплавные включения в клинопироксене (1) и кварце (2); 3 – породы; 4, 5 – эволюция расплавов с максимальными содержаниями  $\text{SiO}_2$  (4) и  $\text{MgO}$  (5); б – 1 – расплавные включения в клинопироксене; 2 – породы; 3 – эволюция расплавов с максимальным содержанием  $\text{MgO}$ .

Прежде всего, применение программы COMAGMAT показало, что для обоих месторождений клинопироксены начинают массово кристаллизоваться на глубинах около 16 км, что подтверждает данные, полученные с помощью программ PETROLOG и WinPLtb.

Результаты расчетного моделирования для базальтовых магм месторождения Кызыл-Таштыг представлены на рисунке а,

на котором видны два тренда: высокомагнезиальный и с максимальными значениями  $\text{SiO}_2$ . В первом случае тренд для расплавов сначала показывает повышенные содержания  $\text{MgO}$  (9.5–7.5 мас. %) и высокие расчетные температуры (1250–1190 °С). При этом он фактически проходит через основную группу расплавных включений в клинопироксене с близкими характеристиками  $\text{MgO}$  (10–8 мас. %) и температур гомогенизации (1210–1170 °С). В дальнейшем в расплаве падают содержание  $\text{MgO}$  (до 5.8–5 мас. %) и температура (до 1140–1130 °С), что фиксируется второй группой включений (см. рис. а) с содержанием  $\text{MgO}$  5.8–5.4 мас. % и температурами гомогенизации 1140–1120 °С. В целом, сходство результатов экспериментального изучения расплавных включений в клинопироксене с расчетными данными подтверждает достоверность последних.

Второй расчетный тренд начинается от второй группы включений в клинопироксене с содержанием  $\text{SiO}_2$  около 56 мас. % и показывает непрерывное изменение (трассируемое точками пород от андезибазальтов до риолитов) состава расплава до содержания  $\text{SiO}_2$  73 мас. % (см. рис. а). При этом температуры конечных кислых

расплавов (зафиксированных во включениях в кварце из андезитов и риолитов месторождения Кызыл-Таштыг) составляли около 1065–1045 °С.

В случае Валенторского месторождения расчетное моделирование показывает более простую ситуацию развития магматизма с непрерывной эволюцией составов расплавов от андезибазальтов до риодацитов, в целом, совпадающую со вторым трендом для месторождения Кызыл-Таштыг. Расчеты показали, что тренд расплавов Валенторского месторождения в диапазоне содержаний MgO 5.5–3 мас. % (1185–1105 °С) пересекает основную группу включений в клинопироксене с температурами гомогенизации 1165–1130 °С. При этом кислые расплавы (SiO<sub>2</sub> 67–70 мас. %) имеют температуры гомогенизации 1050–1030 °С.

В целом, исследования с помощью расчетного моделирования по программе COMAGMAT на основе данных по расплавленным включениям показало, что сочетание контрастных по составу вулканогенных комплексов в окружении колчеданных месторождений Урала и Сибири – не случайный факт, а результат сложной (возможно, как в случае Восточной Тувы – многоступенчатой) эволюции глубинных исходных базальтоидных магм при их подъеме в верхние горизонты.

*Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор № 14.Y26.31.0029).*

## Литература

*Зайков В.В.* Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин: на примере колчеданозных зон Урала и Сибири. М.: Наука, 2006. 429 с.

*Масленников В.В.* Литогенез и колчеданообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. 384 с.  
Медноколчеданные месторождения Урала: Геологическое строение. Свердловск: УрО АН СССР, 1988. 241 с.

*Симонов В.А., Ковязин С.В., Масленников В.В.* Физико-химические параметры магматических систем на Валенторском колчеданном месторождении (Северный Урал) // Металлогения древних и современных океанов–2009. Модели рудообразования и оценка месторождений. Миасс: ИМин УрО РАН, 2009. С. 184–186.

*Симонов В.А., Котляров А.В.* Физико-химические параметры кислых магматических систем, имеющих тесную связь с формированием сульфидных месторождений в древних субдукционных (переходных континент-океан) зонах // Металлогения древних и современных океанов–2016. От минералогенеза к месторождениям. Миасс: ИМин УрО РАН, 2016. С. 46–50.

*Симонов В.А., Котляров А.В.* Условия формирования магматических комплексов, вмещающих раннекембрийские колчеданные месторождения // Металлогения древних и современных океанов–2019. Четверть века достижений в изучении субмаринных месторождений. Миасс: ИМин УрО РАН, 2019. С. 26–29.

*Симонов В.А., Масленников В.В.* Геодинамика магматических систем на Валенторском колчеданном месторождении (Северный Урал) // Металлогения древних и современных океанов–2018. Вулканизм и рудообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2018. С. 22–26.

*Ariskin A.A., Barmina G.S.* COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications // *Geochemistry International*. 2004. Vol. 42 (Supp. 1). P. S1–S157.

*Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu.* Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2011. Vol. 12. N 7. Q07021.

*Yavuz F., Yildirim D.K.* A Windows program for pyroxene-liquid thermobarometry // *Periodico di Mineralogia*. 2018. Vol. 87. P. 149–172.