

В. А. Симонов, А. В. Котляров
Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск
simonov@igm.nsc.ru

**Физико-химические параметры кислых магматических систем,
имеющих тесную связь с формированием сульфидных месторождений
в древних субдукционных (переходных континент-океан) зонах**

В последние годы в результате изучения расплавных включений в кварце получен значительный объем информации о физико-химических параметрах кристаллизации кислых магматических комплексов пород, обладающих тесной пространственной и генетической связью с колчеданными месторождениями Урала и Алтае-Саянской складчатой области [Наумов и др., 1999; Симонов и др., 1999; 2005; 2006; Карпухина и др., 2013; Simonov et al., 2010]. В нашем распоряжении имеется представительное количество оригинальных данных (около 200 анализов) по составам расплавных включений в кварце из пород месторождений Урала (Яман-Касы и Вишневское) и Алтае-Саянской области (Кызыл-Таштыг, Юбилейное и Салаирское рудные поля в Сибири, а также Николаевское в Казахстане). Этот значительный объем данных дополнен информацией по составу включений в кварце месторождений Верхнеуральского рудного района (около 30 анализов) из работы [Наумов и др., 1999].

Судя по результатам предыдущих работ, большинство отмеченных выше колчеданных месторождений формировалось в древних субдукционных (переходных континент-океан) зонах в условиях развития островных дуг и окраинных морей (или задуговых бассейнов) различного возраста [Масленников, Зайков, 1998; Симонов и др., 1999; Лапухов и др., 2001; Зайков, 2006]. К наиболее древним (кембрийским) структурам принадлежат месторождения Тувы (Кызыл-Таштыг) и Салаирского кряжа. Для сульфидных месторождений Урала возраст вмещающих толщ варьирует от силура (Яман-Касы) до девона (Вишневское и Верхнеуральский район). Месторождения Рудного Алтая (Юбилейное и Николаевское) формировались в девоне. Таким образом, на основе изучения расплавных включений есть возможность выяснить особенности эволюции во времени параметров магматических систем, тесно связанных с формированием колчеданных месторождений.

Расплавные включения исследовались в высокотемпературной микротермокамере с инертной средой [Соболев, Слуцкий, 1984]. Эксперименты с включениями в кварце при высоких температурах проводились согласно методикам, опубликованным ранее [Симонов, 1993; Sobolev, Danyushevsky, 1994]. Учитывая высокие содержания SiO_2 и, соответственно, повышенную вязкость расплавов во включениях, время опытов было увеличено по сравнению с экспериментами с включениями в минералах из основных пород. Составы стекол расплавных включений проанализированы на рентгеновском микроанализаторе «Camebax-micro» (Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск).

В кварце из пород рассмотренных месторождений исследовались первичные расплавные включения (10–50 мкм), которые равномерно располагаются в центральных частях вкрапленников либо формируют прямолинейные полосы по зонам роста кристаллов. Формы включений правильные округлые, с некоторой огранкой. Часть включений содержит прозрачное стекло с газовым пузырьком, а другие – заполнены

микрoзернистой темной массой. В ходе высокотемпературных экспериментов (820–850 °С) во включениях изменяются фазы, и по краям появляется светлая кайма расплава. При температурах 900–1000 °С содержимое большинства включений плавится, и в расплаве обособляется несколько газовых пузырьков, которые при повышении температуры заметно уменьшаются. Если во включениях сохранились кристаллические фазы, то при дальнейшем нагреве они расплавляются, и в гомогенном расплаве остается один газовый пузырек. Полностью гомогенными включения из кварца месторождений Алтае-Саянской области становятся в большинстве случаев при температурах 1055–1180 °С. Близкие температуры гомогенизации расплавных включений в кварце эффузивов были получены и другими исследователями [Бабанский и др., 1995; Титов и др., 1996; Карпухина и др., 1998]. В то же время, для месторождений Урала определен более широкий диапазон температур гомогенизации (910–1190 °С) включений в кварце, частично совпадающий с данными по Алтае-Саянской области, а также включающий и более низкие значения (910–1030 °С), установленные для месторождения Яман-Касы. Реальность этого широкого интервала подтверждается закономерными связями значений температур с составами включений. В частности, при понижении температур гомогенизации (от 1190 до 910 °С) последовательно растет железистость (FeO/MgO от 5 до 22) и падает содержание MgO во включениях.

По химическому составу расплавные включения в кварце из порфиров рассмотренных колчеданных месторождений в подавляющем большинстве случаев соответствуют риодацитам и риолитам нормальной щелочности. Минимальное количество щелочей (2.1–4.8 мас. %) характерно для древних (кембрийских) расплавов (месторождения Тувы и Салаира в Сибири), а максимальное (с широким диапазоном суммы щелочей от 2.2 до 8 мас. %, в единичных случаях до 9 мас. %) – для наиболее молодых (девонских) месторождений Рудного Алтая – Юбилейное в Сибири и Николаевское в Казахстане. Для промежуточных по возрасту (силур–девон) месторождений Урала также отмечен фактически промежуточный характер магматизма с образованием двух трендов эволюции расплавов и уменьшением значений щелочей на фоне роста SiO_2 . Один тренд (падение суммы щелочей от 3.9 до 2.5 мас. %) совпадает с данными по кембрийским системам и с минимальными значениями для девонских, другой (от 7.4 до 3.8 мас. % щелочей) – близок максимальным данным для девонских расплавов (рис.).

По соотношению $FeO/MgO-SiO_2$ (критерий А. Мияширо) подавляющее большинство точек составов расплавных включений в кварце из пород рассмотренных месторождений располагается в поле толеитовых серий. Все данные разбиваются на две группы по значениям FeO/MgO : 5–14 и 15–26. В случае девонских месторождений повышенной железистостью обладают только риодацитовые (SiO_2 до 74–75 мас. %) расплавы.

Для включений в кварце месторождений Алтае-Саянской области характерны вариации отношения K_2O/Na_2O в диапазоне 0.4–2.4, соответствующие К–Na сериям. В то же время включения в кварце месторождений Урала обладают гораздо более низкими значениями K_2O/Na_2O (0.15–0.44) и располагаются на границе между К–Na и Na сериями.

Отношения K_2O/TiO_2 должны быть наиболее близки исходным глубинным характеристикам магматических систем, т. к. в ходе фракционирования расплавов в них одновременно возрастают содержания обоих компонентов. Это положение подтверждается данными по включениям в кварце из пород месторождений Урала, в которых

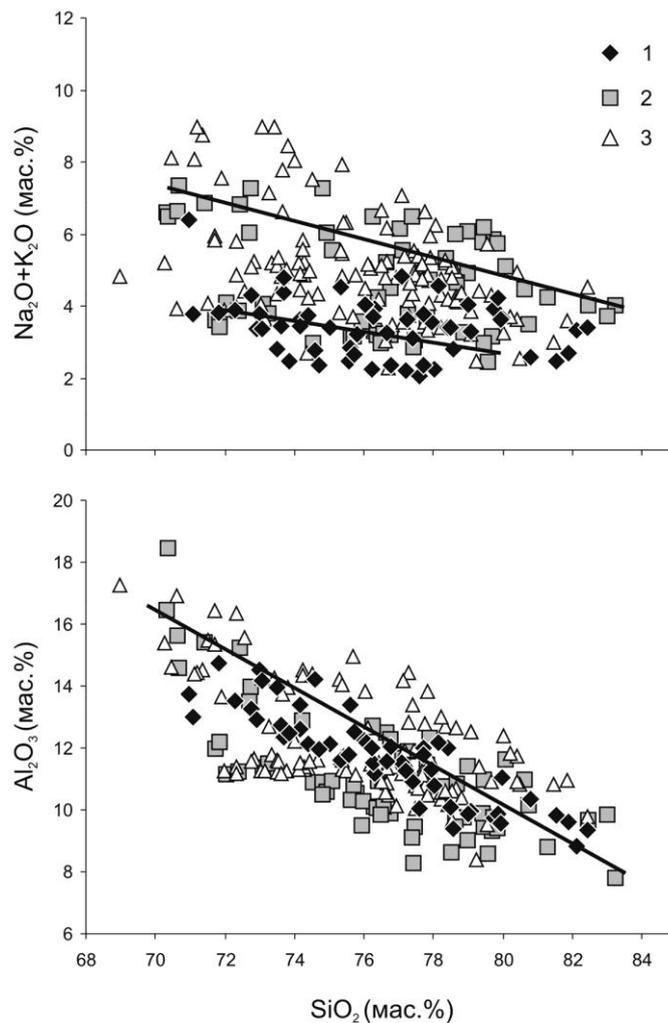


Рис. Зависимость содержания суммы щелочей и Al_2O_3 от количества SiO_2 в составе расплавных включений в кварце из пород колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области.

1–3 – расплавные включения в кварце из кембрийских (1 – Кызыл-Таштыг и Салаирское рудное поле), силурийских и девонских (2 – Яман-Касы, Вишневокское и Верхнеуральский рудный район), девонских (3 – Юбилейное и Николаевское) пород колчеданных месторождений Урала (2) и Алтае-Саянской области (1, 3). Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов [Наумов и др., 1999].

значения $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ находятся в относительно узком (3–10) диапазоне независимо от количества SiO_2 . Это минимальные значения по сравнению с данными по включениям в кварце из кембрийских (до 30) и девонских (до 55) пород Алтае-Саянской области. Таким образом, кислые расплавы месторождений Алтае-Саянской области были изначально обогащены щелочами (калием) по сравнению с относительно примитивными глубинными магматическими системами Урала.

На вариационных диаграммах Харкера содержания основных химических компонентов (TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O) падают на фоне роста SiO_2 в изученных включениях в кварце, независимо от возраста и местоположения месторождений. Это хорошо видно на примере Al_2O_3 , количество которого отчетливо уменьшается от 17 до 8 мас. % при накоплении SiO_2 (см. рис.), что свидетельствует о фракционировании плагиоклазов (с образованием вкрапленников) в ходе дифференциации расплавов.

Показывая единообразные направления трендов фракционирования на диаграммах Харкера, расплавные включения в кварце из различных месторождений обладают некоторыми особенностями поведения отдельных химических компонентов. Максимальные значения FeO и MgO характерны для древних (кембрийских) расплавов, а минимальные – для молодых (девонских). Магматические системы Урала (силур–девон) занимают промежуточное положение с образованием двух трендов, ассоциирующих с максимальными (кембрий) и минимальными (девон) значениями. Расплавы месторождений Урала обладают максимальными содержаниями кальция и натрия по сравнению с магмами Алтае-Саянской области. Для калия устанавливается обратная картина со значительным обогащением (K_2O до 3.9 мас. %) расплавов Рудного Алтая при минимальных Na_2O (до 0.8 мас. %). Для фосфора и хлора (как и для основных петрогенных компонентов) характерно падение значений на фоне роста SiO_2 в расплаве, независимо от возраста и местоположения месторождений. В то же время существуют резкие отличия по абсолютному содержанию этих компонентов. Так, расплавы месторождений Урала содержат значительно больше P_2O_5 и меньше Cl по сравнению с кислыми расплавами Алтае-Саянской области.

В целом, на основе представленных данных по расплавным включениям в кварце можно сделать следующие выводы о физико-химических условиях кислых магматических систем, имеющих тесную связь с формированием сульфидных месторождений Урала и Алтае-Саянской области. Имеются общие характеристики расплавов для всех рассмотренных колчеданных месторождений, независимо от возраста и местоположения: наличие высокотемпературного (1055–1180 °C) интервала кристаллизации, падение содержания всех основных химических компонентов на фоне роста SiO_2 , а также разделение на две группы по значениям железистости. Существует определенная эволюция во времени составов кислых расплавов, имеющих тесную связь с колчеданными месторождениями: растут содержания суммы щелочей и падает количество железа и магния при переходе от древних (кембрийских) к наиболее молодым (девонским).

Несмотря на определенное сходство кислых магматических систем Урала и Алтае-Саянской области, существуют и различия. Прежде всего, это гораздо более широкий интервал температур кристаллизации (с минимальными значениями до 910 °C) обогащенных натрием и фосфором расплавов Урала в отличие от преимущественно высокотемпературных, с повышенными содержаниями калия и хлора магм Алтае-Саянской области. Установленное сходство кислых магматических систем в различных колчеданных месторождениях обусловлено тем, что все они формировались фактически в однотипной палеогеодинамической обстановке, связанной с развитием субдукции в переходной зоне континент-океан. Различия, скорее всего, могут быть следствием приуроченности месторождений к определенным структурам этих сложных по своему строению зон. В частности, девонские месторождения формировались преимущественно в условиях островных дуг, а кембрийские – в задуговых бассейнах.

Работа выполнена при поддержке проекта VIII.66.1.1., РФФИ (проект № 16-05-00313) и проекта совместных исследований СО РАН и УрО РАН.

Литература

- Бабанский А. Д., Ашихмина Н. А., Коваленко В. И., Лятифова Е. Н., Кононкова Н. Н. Исходная магма пород Верхнекегемского кальдерного комплекса (Северный Кавказ) по данным изучения включений в минералах // Доклады академии наук. 1995. Т. 344. № 2. С. 226–228.
- Зайков В. В. Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин: на примере колчеданосных зон Урала и Сибири. М.: Наука, 2006. 429 с.
- Карпухина В. С., Наумов В. Б., Баранов Э. Н., Кононкова Н. Н. Состав расплавов кислых вулканитов Верхнеуральского рудного района (Южный Урал) по данным изучения включений в кварце // Доклады академии наук. 1998. Т. 358. № 1. С. 100–103.
- Карпухина В. С., Наумов В. Б., Викентьев И. В. Генезис колчеданных месторождений Верхнеуральского рудного района (Южный Урал, Россия): свидетельства магматического вклада металлов и флюида // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55. № 2. С. 145–165.
- Лапухов А. С., Симонов В. А., Ковязин С. В. Особенности формирования магматических комплексов Салаирского колчеданно-полиметаллического рудного поля (Западная Сибирь) // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 8. С. 1186–1195.
- Масленников В. В., Зайков В. В. Колчеданосные палеогидротермальные поля окраинно-океанических структур Урала (классификация, рудные фации, модель развития). Миасс: ИМин УрО РАН, 1998. 92 с.
- Наумов В. Б., Карпухина В. С., Баранов Э. Н., Кононкова Н. Н. Составы расплавов, содержания летучих компонентов и элементов-примесей, температуры кристаллизации кварца кислых вулканитов Верхнеуральского рудного района (Южный Урал) // Геохимия. 1999. № 4. С. 339–351.
- Симонов В. А. Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1993. 247 с.
- Симонов В. А., Гаськов И. В., Ковязин С. В., Борисенко А. С. Эволюция геохимических параметров кислых расплавов при формировании колчеданных месторождений Рудного Алтая // Доклады академии наук. 2005. Т. 403. № 5. С. 674–677.
- Симонов В. А., Зайков В. В., Ковязин С. В. Палеогеодинамические условия развития гидротермальных систем Кызыл-Таштыгского месторождения (Восточная Тува) // Металлогения древних и современных океанов–1999. Рудоносность гидротермальных систем. Миасс: ИМин УрО РАН, 1999. С. 16–23.
- Симонов В. А., Ковязин С. В., Тереня Е. О., Масленников В. В., Зайков В. В., Масленникова С. П. Физико-химические параметры магматических и гидротермальных процессов на колчеданном месторождении Яман-Касы, Южный Урал // Геология рудных месторождений. 2006. Т. 48. № 5. С. 423–438.
- Соболев А. В., Слуцкий А. Б. Состав и условия кристаллизации исходного расплава сибирских меймечитов в связи с общей проблемой ультраосновных магм // Геология и геофизика. 1984. № 12. С. 97–110.
- Титов А. В., Владимиров А. Г., Крук Н. Н., Палесский С. В. Петрогенезис и возраст вулканитов Кызылрабатской структуры (Юго-Восточный Памир) // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 5. С. 62–72.
- Simonov V. A., Gaskov I. V., Kovyazin S. V. Physico-chemical parameters from melt inclusions for the formation of the massive sulfide deposits in the Altai–Sayan Region, Central Asia // Australian Journal of Earth Sciences. 2010. Vol. 57. P. 737–754.
- Sobolev A. V., Danyushevsky L. V. Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of the Tonga trench: constraints on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas // Journal of Petrology. 1994. Vol. 35. P. 1183–1211.