

## РОЛЬ СТРУКТУРНЫХ УСЛОВИЙ РАЗГРУЗКИ ВУЛКАНОГЕННЫХ ФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ В ФОРМИРОВАНИИ ЗОН РУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

В.Н. Шарапов<sup>1</sup>, Е.П. Бессонова<sup>1</sup>, А.С. Лапухов<sup>1</sup>, К.В. Чудненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии СР РАН, Новосибирск, e-mail: vik@uiggm.nsc.ru

<sup>2</sup>Институт геохимии СО РАН, Иркутск

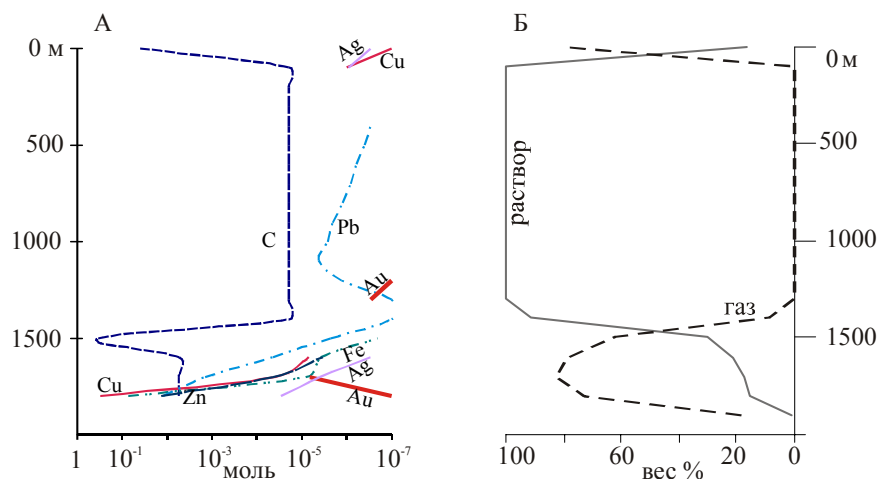
На примере золото-серебряных месторождений Южно-Камчатского рудного района рассмотрена двумерная модель неизотермической физико-химической динамики формирования минералогических зон и стадий высоко сернистых и эпитеpmальных месторождений, учитывающей установленные Т-Р характеристики конкретных объектов и палеоструктурные условия разгрузки гидротермальных систем. Математическая модель такой системы изложена в [Шарапов и др., 2008] поэтому отметим наиболее существенные ее элементы, которые будут приняты в рассматриваемой ее реализации из структурных, геометрических и параметрических данных изучения указанных месторождений: 1) в массивах интрузивных и эффузивных пород имеется проницаемая зона шириной, которой порядка 10 м. По такой проницаемой зоне от границы ретроградного кипения расплава в мало глубинной интрузивной камере фильтруется магматический преимущественно водный флюид; 2) температура флюида порядка температуры солидуса ( $T_{\text{сол}}$ ) кипящего расплава. Нами рассматривается сопряжение интрузива, в котором происходит ретроградное кипение магмы, с плоской вертикальной флюидопроводящей зоной, соединяющей границу кипения и поверхность вулканической постройки. Полагаем, что в неупругом пространстве пористых горных пород из магматического «источника» движется горячий гидротермальный флюид. Потоки тепла и массы в гидротермальной приповерхностной системе направлены от магматического источника флюида в вертикальную зону повышенной проницаемости протяженностью  $L$  и шириной  $2y_0$  ( $L_2$ ). Имеется две структурные ситуации разгрузки, - 1) есть верхний флюидоупор, 2) нет верхнего флюидоупора, при этом происходит только истечение флюида через трещины и его охлаждение при сложном законе теплоотдачи на поверхности вулканической постройки [Шарапов и др., 2008]. При этом расход флюида из магматического источника задается из решения задачи о затвердевании магматического тела с учетом динамики кипения в двухфазной зоне расплава, содержащего растворенный водный флюид [Шарапов, Аверкин, 1990; Шарапов и др., 2004]. Из-за теплопотерь в боковые породы в потоке магматического газа происходит его конденсация с формированием гидротермального раствора. В зависимости от величины коэффициента теплопередачи в боковые породы ( $\alpha_2$ ) проницаемости и эффективной пористости порода во флюидопроводнике, а также значений коэффициента теплопередачи на границе разгрузки флюида на поверхности вулканической постройки ( $\alpha_1$ ) в системе «флюидопроводник - вмещающая порода» со временем возможно развитие различных сценариев динамики фазовых переходов. При численной реализации такой многофронтной модели ОМФС примем некоторые упрощающие допущения, не нарушающих сущности рассматриваемого процесса: 1) для жидкой фазы считаем справедливым уравнение состояния слабо сжимаемой жидкости, а для газообразных фаз – уравнение состояния идеального газа; 2) локальные температуры флюидопотока и пористой породы практически равны; 3) фазовые границы считаем резкими, а гидротермальный флюид однофазным. Принятая «идеализация» модели обосновывается следующим: а) область фильтрации считается кусочно-однородной по проницаемости, б) исключая явления перегрева (переохлаждения); принимаем, что ширина зоны возможного развития конвекции флюида в рассматриваемой пористой среде мала по сравнению с размером области фильтрации. Движение границ в интрузиве (солидуса, ликвидуса, ретроградного кипения) и флюидопроводнике (конденсации магматического газа -  $L_1$ , декомпрессионного кипения водного раствора –  $L_{32}$ , конденсации пара –  $L_{23}$ ) описываются в рамках приближения Стефана [Шарапов, Аверкин, 1990]. Для описания физико-химической динамики взаимодействия «флюид-порода» используется решение теплодинамической задачи, в которой в качестве фиктивной диаграммы состояния используется проточно-реакторная модификация ПК СелекторWin [Бессонова, Чудненко, 2007].

Центральной генетической проблемой вулканогенных Au - Ag как месторождений Камчатки, так и других регионов активных окраин, является пространственное и временное

соотношения эпitherмальных и сульфидных руд на сложных месторождениях (Мутновское, Родниковое) или возможность существования пространственно разделенных двухуровневой рудной зоны на Асачинском месторождении. Численное моделирование динамики фазовых границ в рамках изложенного приближения структурно-геологических ситуаций на месторождениях Южной Камчатки показывает, что генезис структурно-минералогических и физико-химических параметров Au-Ag месторождений данного рудного района определяется структурными условиями разгрузки гидротермальных систем, - ортомагматические системы (ОМФС), формирующие высокосульфидные золото-серебряные месторождения, не имеют в зоне разгрузки стационарных флюидоупоров, в их недрах проявляются только предельно узкие перемещающиеся к поверхности вулканических построек области сопряжения фазовых барьеров, вызывающих быстрое нарастание перед фронтом декомпрессионного кипения повышения концентрации раствора по широкому спектру растворенных мало летучих компонентов. Среди ОМФС с верхним флюидоупорным «горизонтом» просматривается возможность реализации трех типов гидротермальных систем, - 1) в которых из-за высоких боковых теплопотерь вообще не реализуется малоглубинная область декомпрессионного кипения; 2) таких, в которых приповерхностные области декомпрессионного вскипания появляются в начальные времена формирования тепловой волны, после чего область такого кипения сосредотачивается практически внутри толщи пород флюидоупора; 3) тех систем, в которых квазистационарная область декомпрессионного кипения устанавливается после начального периода нестабильности или достижения в системе некоторого теплового равновесия. В системах третьего типа возможно нестабильное, в том числе, периодическое колебание границы декомпрессионного кипения в некотором интервале глубин. Обратим внимание еще на один весьма интересный и возможно существенный для динамики формирования рудоносных для высоко сульфидных месторождений типа Мутновского, - при отсутствии флюидоупоров в некотором интервале  $T - P$  в потоках флюидов возникает область декомпрессионного кипения, размер которой менее метра. Такой подвижной геохимический барьер под собой будет концентрировать все рудные компоненты водного раствора, для которых коэффициент распределения ( $K_d$ ) при испарении  $1 > K_d$ , но обогащать паровую зону теми, чьи  $K_d > 1$  [Nagaseki, Hayashi, 2008]. Чем раньше в потоке флюида возникает этот фазовый барьер, тем более концентрированный раствор накапливается по ним [Шарапов, Милова, 1979]; и тем быстрее при снижении  $T$  и  $P$  по потоку начнется отложение рудных минералов из паровой фазы.

Для описанных высоко-сульфидных и эпitherмальных месторождений присущи все виды текстур и структур, описанных на подобных объектах. Для всех фазовых областей рудообразующих флюидов, в которых происходит формирование жил выполнения, характерно появление резко зональных кристаллов кварца в микродрозах и ритмически построенные чередования минералов (галенит-сфалерит, кварц - кварц+адуляр - газовые поры с набором рудных и нерудных минералов, ритмические сферолиты и т.п.). Размеры ритмически построенных полос в рудных жилах на описанных месторождениях колеблются от полумиллиметра до нескольких см. При этом на - или у границ ритмических чередований такого рода полос отлагается основное количество рудных минералов и имеются разных размеров и форм пустоты (газовые полости). Следовательно, при рудообразовании как из гомогенных, так и гетерофазных флюидов реализовались условия ритмической кристаллизации. Общее математическое описание фазовых портретов для рассматриваемых гетерофазных систем пока не получено. Из результатов изучения физико-химических параметров формирования руд Асачинского месторождения следует, что при содержания солей порядка 2% - 8% масс. по эквиваленту NaCl отложение кварцевых микродроз отвечает составу жидкого флюида у границы насыщения [Боровиков и др., 2009]. Исследование структур ритмического рудоотложения с помощью электронного сканирующего микроскопа показывает, что отложение адуляра в ассоциации с кварцем происходит из водно-газовой смеси, а рудных минералов - из газовой фазы. Более полное приближение описания равновесной физико-химической динамики гетерофазного массообмена в рассматриваемых системах требует учета влажности водяного пара между границами декомпрессионного кипения и конденсации. Использование фиктивной диаграммы состояния в рамках приближений типа [Бессонова, Чудненко, 2007] позволит, при наличии добротных и достаточно полных баз, данных существенно конкретизировать изложенные соотношения в отношении влияния фазовых барьеров на зональное отложение рудных минералов в

вертикальных разрезах рудообразующих систем. Для начального этапа такого рода моделирования неизотермической физико-химической динамики при проявлении фазовых переходов нами рассмотрены некоторые тестовые реализации описанных выше случаев фазовой зональности в вулканогенных флюидных системах. Полученные виртуальные динамические картины зональности отложения ряда рудных элементов (рис. 1) имеют элементы аналогии с их реальными распределениями в вулканогенных рудных месторождениях [Петренко, 1999; Волков, 2005; Боровиков и др., 2009]: 1) в области магматического надкритического флюида с аквакомплексами, -  $Pb+Cu+Zn+Ag \rightarrow Pb+Zn+Ag \rightarrow Pb+Au$ ; 2) в области гидротермальных растворов, -  $Pb+Cu+Zn+Ag$ , 3) в зоне декомпрессионного



**Рис. 1.** Распределение некоторых элементов (А) и фазовых границ (Б) в разрезе к 700 годам развития системы по результатам моделирования.

кипения, -  $Ag_{max}$  в нижней части; в верхней части области под флюидоупором, -  $Ag+Au$  с добавлением полиметаллов. В приложениях рассмотренной модели ОМФС не удается описать наблюдаемую на всех месторождениях стадийность (прерывистость) рудообразования. Развитие двухуровневых месторождений [Волков, 2005] можно предвидеть в случае сопряжения протяженной зоны гидротермального рудоотложения, выше которой под флюидоупором располагается область декомпрессионного кипения протяженностью более 150-200 м или протяженной области гидротермального флюида с относительно небольшой областью декомпрессионного кипения под флюидоупором. Более глубокая область рудной минерализации может быть под границей конденсации магматического газа (рис. 1). Теплофизические условия развития такого рода флюидных систем в рамках развитой модели в первом приближении удалось очертить, однако в описании динамики фазовых переходов с использованием указанной выше фиктивной диаграммы состояния получить удовлетворительные результаты воспроизведения известных в литературе природных реализаций пока не удалось.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-05-00910).

### Список литературы

**Боровиков А.А., Лапухов А.С., Борисенко А.С.** Физико-химические условия формирования эпitherмального Асачинского Au-Ag месторождения (Ю Камчатка) // Геология и геофизика, 2009. Т. 50. № 8 (в печати).

**Волков А.В.** Закономерности размещения и условия формирования золоторудных месторождений в зонах тектоно-магматической активизации Северо-Востока России // Геол. руд. мест., 2005. Т. 47. С. 211-229.

**Бессонова Е.П., Чудненко К.В.** Сравнительный анализ результатов моделирования движения магматогенного флюида через вулканогенный разрез с применением минимизации энергии Гиббса и потенциала Гельмгольца // Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды. Материалы Всероссийской научной конференции. Иркутск, 2007. Т. 3. С. 127-131.

**Петренко И.Д.** Золото-серебряная формация Камчатки. Петропавловск-Камчатский. Санкт-Петербургская картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 1999. 113 с.

**Шарапов В.Н., Милова Л.В.** Температурная эволюция приповерхностных гидротермальных систем и некоторые вопросы динамики рудоотложения на геохимических барьерах // Основные параметры природных процессов эндогенного рудообразования. Т. 1. Новосибирск: Наука. 1979. С. 29-51.

**Шарапов В.Н., Аверкин Ю.А.** Динамика тепло- и массообмена в ортомагматических флюидных системах. Новосибирск. Наука. 1990. 193 с.

**Шарапов В.Н., Бессонова Е.П., Черепанова В.К.** Оценка возможных размеров и времени существования области надкритического флюида в субэкральных смешанных термальных системах андезитовых вулканов // Доклады РАН, 2004. Т. 307. № 1. С. 97-100.

**Шарапов В.Н., Черепанов А.Н., Черепанова В.К., Бессонова Е.П.** К динамике фазовых барьеров во флюидных рудообразующих системах вулканических дуг // Геология и геофизика, 2008. Т. 49. № 11. С. 1098-1109.

**Corbett G.J.** Epithermal gold for explorations // AIG Journal – Applied geoscientific practice and research in Australia. Paper 2002-01, February 2002. P. 1-26.

**Nagaseki H., Hayashi K.** Experimental study of the behavior of copper and zinc in a boiling hydrothermal system // Geology, 2008. V. 36. № 1. P. 27-30.