

На правах рукописи

Васильева

ВАСИЛЬЕВА Евгения Владимировна

**ГЕОХИМИЯ МАГМАТОГЕННО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ
СИСТЕМ НА ГРАНИЦЕ ПЛАСТИЧНО-ХРУПКОГО
ПЕРЕХОДА В ЗЕМНОЙ КОРЕ
(ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ)**

Специальность 25.00.09 – геохимия, геохимические методы
поисков полезных ископаемых

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

ИРКУТСК
2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Геологическом институте СО РАН (ГИН СО РАН)

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук

Жатнуев Николай Сергеевич

Официальные оппоненты:

доктор геолого-минералогических наук, профессор

Скворцов Валерий Александрович

кандидат геолого-минералогических наук

Бычинский Валерий Алексеевич

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Защита состоится «16» марта 2012 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.059.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского 1а.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, по адресу: 664033 Иркутск, ул. Фаворского 1а.

Автореферат разослан «02» февраля 2012 г.

e-mail: korol@igc.irc.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.г.-м.н.

Г. П. Королева — Г.П. Королева

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Полученные за последние десятилетия фактические данные по геохимии магматогенно-гидротермальных систем (МГС) требуют физико-математического и химико-термодинамического анализа, обобщения и интерпретации в виде согласованной концептуальной модели, наибольшую конструктивность и наглядность которой придает компьютерная реализация. В настоящее время все еще преобладают взгляды на формирование МГС в виде только конвективного теплопереноса в трещиновато-пористой среде, контролируемого теплом магматического очага. Такой подход не учитывает реологические свойства вмещающей среды и связанные с ними геохимические барьеры, а также оставляет «за кадром» химическую термодинамику взаимодействия флюид/порода как в конвективной ячейке, так и в процессе привноса глубинного и метеорного вещества. Поэтому сейчас важна интерпретация эволюции МГС именно с реологических позиций, позволяющих задать обоснованные входные данные для расчета химико-термодинамического взаимодействия сред в различных реологических обстановках. Весьма актуален и вопрос о транспорте глубинного вещества в верхние этажи литосферы и участии его в эволюции МГС.

Целью исследования является создание согласованной модели магматогенно-гидротермальной системы с привносом глубинного и метеорного вещества вблизи зоны пластично-хрупкого перехода (ПХП).

Задачи работы:

1. Развитие методики комплексного компьютерного моделирования геохимических объектов, включающей четыре взаимосвязанных этапа: геометрический, физический, физико-химический и динамический.
2. Разработка сценариев эволюции МГС в зависимости от положения магматического очага относительно зоны ПХП; расчет физических параметров в каждом узле модельной сетки в соответствии со сценарием.
3. Разработка физико-химической многорезервуарной модели МГС с расчетом исходных равновесных минеральных парагенезисов, а также химического состава пород и флюида в каждом узле модельной сетки:
 - 1) для траектории подъема глубинного флюида в пластической области с прорывом в область хрупких деформаций;
 - 2) для зоны конвективного движения подвижной группы фаз в трещиновато-пористой среде в области хрупких деформаций.
4. Разработка методики тектонофизического эксперимента на оптически активных средах в поляризованном свете; проведение серии экспериментов; разработка программного обеспечения для цифрового анализа результатов экспериментов.

Защищаемые положения:

1. Возникновение и эволюция МГС возможны по трем сценариям:
 - 1) внедрение магмы в область хрупкости пород ведет к смешению

- ювенильного и метеорного вещества при промывании быстро остывающего очага гидротермальными растворами;
- 2) при локализации очага в области пластично-хрупкого перехода имеет место быстрое остывание апикальной части массива и частичное смещение ювенильного и метеорного материала;
 - 3) если очаг локализуется в области пластичности, загрязнение массива метеорным веществом практически исключается, а в области хрупкости формируются низкотемпературные гидротермальные системы с метеорным составом растворов.
2. В изолированных флюидозаполненных полостях в зоне пластичности пород возникает избыточное давление, позволяющее полости перемещаться в поле силы тяжести путем гидроразрыва в голове и смыкания пород в хвостовой части.
 3. При подъеме флюида из зоны пластичности в хрупкую зону на реологическом переходе возникает принципиальный геохимический барьер, вызывающий осаждение компонентов флюида.

Научная новизна:

1. Предложена оригинальная концептуальная модель трех вариантов развития МГС в зависимости от глубины зоны ПХП с наличием геохимического барьера при прорыве флюида из пластичной зоны в хрупкую.
2. На основе этой концептуальной модели разработана комплексная компьютерная модель физико-химической эволюции МГС в зоне изменения реологических свойств пород с привнесением глубинного и метеорного вещества.
3. Экспериментально обоснована оригинальная гипотеза транспорта глубинного вещества, находящегося в условиях пластичной реологии, в зону хрупких деформаций посредством перемещения в поле силы тяжести замкнутых флюидозаполненных полостей.

Фактический материал. Данные по химическому составу природных сред и базы термодинамических данных были любезно предоставлены непосредственно Н.С. Жатнуевым, В.И. Васильевым (Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ), К.В. Чудненко, В.А. Бычинским (Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск) и С.Н. Рычаговым (Институт вулканологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский).

В работе также использовался фактический материал, самостоятельно полученный автором в результате экспериментальных исследований, проводимых при финансовой поддержке гранта НШ–2284.2003.5 и Президиумов СО и ДВО РАН (проект № 117–09–II–СО–08–006). Кроме этого, фактическим материалом работы явились общепризнанные литературные данные по геохимии и минеральному составу горных пород и их термодинамическим свойствам.

Практическая значимость работы.

1. Разработан 2D–вариант многорезервуарного физико-химического моделирования на программном комплексе «Селектор», позволяющий

получать более корректные модели геологических систем с участием твердых и флюидных фаз.

2. Разработанные модели МГС с учетом изменения плотности и давления флюида на геохимическом барьере ПХП позволяют по-новому оценивать продуктивность современных геотермальных месторождений, объяснить природу их строения и структуры.
3. Созданная база физико-химических данных для различных сценариев эволюции МГС, каждый из которых включает 80 минеральных парагенезисов с водным раствором и газовой фазой (итого 240 возможных равновесных ассоциаций) позволит поднять будущие модельные работы на более детальный уровень.

Личный вклад автора. Автором разработаны концептуальные модели эволюции МГС, в чем оказали помощь д.г.-м.н. Н.С. Жатнуев (ГИН СО РАН) и д.г.-м.н. С.Н. Рычагов (ИВиС ДВО РАН). Автором реализованы геометрический, физический и динамический этапы моделирования. Также автором были выполнены все физико-химические расчеты на ПК «Селектор» с применением сторонних программных продуктов (Васильев, ГИН СО РАН; Арискин, ГЕОХИ РАН; Персиков, ИЭМ РАН). Автором также лично разработана методика тектонофизических экспериментов, изготовлены модельные установки, проведены эксперименты и анализ полученного материала, выполнена интерпретация результатов.

Публикации и апробация работы. Основные положения диссертации опубликованы в 19 печатных работах (в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах «Геоинформатика» и «Литосфера» и 1 статья принята в печать в рецензируемый журнал «Вулканология и сейсмология»), а также докладывались на Всероссийской конференции, посвященной 80-летию чл.-корр. РАН Ф.П. Кренделева (Улан-Удэ, 2007), Региональной молодежной конференции, посвященной 50-летию Бурятского научного центра (Улан-Удэ, 2008), Региональной конференции молодых ученых «Современные проблемы геологии, геохимии, геоэкологии Дальнего Востока России» (Владивосток, 2008), Всероссийском научном совещании «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту» (Иркутск, 2008, 2009, 2010), Всероссийском совещании «Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия» (Иркутск, 2009), Всероссийской молодежной конференции «Структура, вещество и история литосферы» (Сыктывкар, 2009), Международной конференции ЮНЕСКО «Глобальные и региональные проблемы устойчивого развития мира» (Улан-Удэ, 2010), Всероссийской молодежной конференции «Геология Западного Забайкалья» (Улан-Удэ, 2011), Международного симпозиума «Large Igneous Provinces of Asia, Mantle Plumes and Metallogeny» (Иркутск, 2011), Всероссийской молодежной конференции «Современные проблемы геохимии» (Иркутск, 2011), Всероссийской конференции «Граниты и процессы рудообразования» (Москва, 2011), научных сессиях и семинарах Геологического института СО РАН, Института геохимии им. А.П. Виноградова

СО РАН, Бурятского научного центра и Бурятского Государственного университета.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы общим объемом 162 страниц печатного текста, 13 таблиц и 106 иллюстраций. Список использованной литературы включает 119 наименований.

Благодарности. Автор считает своим долгом выразить сердечную благодарность в первую очередь своему научному руководителю – д.г.-м.н. Николаю Сергеевичу Жатнуеву за терпеливую плодотворную помощь на протяжении всего времени учебы и работы над диссертацией. Автор душевно благодарит своих учителей: д.г.-м.н. Д.И. Царева, д.г.-м.н. А.Г. Миронова, д.г.-м.н. А.М. Плюснина, к.г.-м.н. В.И. Васильева, к.г.-м.н. Д.А. Орсоева, к.г.-м.н. Г.С. Риппа, к.г.-м.н. Т.Т. Врублевскую и других преподавателей. В подготовке и проведении экспериментов непосредственную помощь оказали Г.Д. Санжиев, М.В. Бурцева и к.г.-м.н. Б.Б. Дамдинов, за что им автор очень благодарна. Особую признательность хотелось бы выразить сотрудникам Лаборатории физико-химического моделирования Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН д.г.-м.н. К.В. Чудненко и к.г.-м.н. В.А. Бычинскому за предоставленные версии ПК «Селектор» и специальные базы термодинамических данных.

ГЛАВА 1. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Магматогенно-гидротермальные системы. Предлагается собственное определение: МГС – это физико-химическая система горных пород с циркулирующим в них флюидом, в которой под воздействием тепла магматического очага, привноса глубинных и метеорных флюидов происходят процессы тепломассопереноса и минералообразования. Кроме стандартных составляющих МГС: магматической системы и системы вмещающих пород, вводится подсистема порового флюида, представляющая собой группу подвижных фаз «раствор + газ» с переменным фазовым и химическим составом.

1.2. Численное физико-химическое моделирование. Доминирование физико-химического направления в геохимических исследованиях закономерно следует из обязательной эволюции вещества в геологических объектах (Жариков, 2005).

В первую очередь это физико-химические процессы, которые тесно и неразрывно взаимосвязаны с химическими и физическими превращениями. По Карпову (1981), существует пять кардинальных проблем компьютерного физико-химического моделирования в геохимии и петрологии, которые сейчас можно изложить следующим образом:

1. Проблема исходных петрофизических и термодинамических данных.
2. Математическая, физическая и термодинамическая постановка моделей геологических объектов, наиболее адекватно отражающая специфику природной эволюции вещества и наилучшим образом приспособленная для численной реализации на компьютере.
3. Алгоритмическое и методологическое обеспечение задач численного физического и физико-химического моделирования.
4. Создание комплекса рабочих программ, необходимых для численного

серийного решения широкого круга геохимических задач.

5. Подробное изучение ряда характерных и наиболее типичных задач геохимии, т.е. построение и интерпретация компьютерных моделей конкретных природных объектов.

Признавая приоритет химико-термодинамического аспекта компьютерного моделирования геохимических систем, заметим, что современные тенденции моделирования подразумевают полный отказ от непространственных моделей в геологических науках, даже в приложениях, где речь идет о моделировании таких процессов и явлений, как химические реакции или процессы кристаллизации магм. В любом случае мы будем иметь дело с физическими и/или химическими свойствами объекта, которые предполагают учет масс, объемов или количеств вещества, и которые невозможно рассматривать отвлеченно от пространственных характеристик. Для решения данной проблемы с участием автора была разработана и успешно апробирована методика комплексного компьютерного моделирования геохимических объектов (Васильев и др., 2009; Васильев, 2009).

1.3. Методика комплексного компьютерного моделирования геохимических объектов включает четыре взаимосвязанных этапа: геометрический, физический, физико-химический и динамический. На *геометрическом этапе* обосновывается размерность моделируемой системы, производится разбиение ее пространства на подсистемы и объединение их в зоны, соответствующие природным обособлениям в составе моделируемого объекта. *Физический этап* предусматривает расчет физических параметров каждой подсистемы, исследование взаимодействия подсистем между собой и установку начальных и граничных условий в системе. В качестве расчетных параметров выступают температура и давление. *Физико-химический этап* предусматривает расчет исходных равновесных составов подсистем, которые рассматриваются как физико-химические резервуары, изначально не взаимодействующие друг с другом. Расчеты предлагается осуществлять методом минимизации термодинамических потенциалов на базе ПК «Селектор» (Чудненко, 2005, 2007, 2010), описание которого также приводится в данном разделе. Входными данными для таких расчетов будут являться рассчитанные на физическом этапе температура и давление в каждом резервуаре, а также набор и концентрации независимых компонентов. Результатом этапа должны являться расчетные равновесные химические составы каждого резервуара (подсистемы). На *динамическом этапе* начальными и граничными условиями являются элементы дискретизации временной области. Главное из рассматриваемых событий при исследовании динамики объекта – это временные изменения, поэтому в первую очередь важно предусмотреть методы объекта как функции вектора времени. При этом учитываемые методы можно разделить на две категории: межрезервуарные методы контролируют изменение свойств зон модели, а межрезервуарные методы описывают взаимодействие резервуаров и изменение их свойств во времени.

1.4. Тектонофизические исследования. После обзора состояния

тектонофизических исследований и современных взглядов на петрофизическое строение земной коры описываются использованный в работе экспериментальный поляризационно-оптический метод исследования напряжений в оптически активных средах (Осокина, 1963; Осокина, Цветкова, 1980) и авторский метод анализа результатов экспериментов. Первичными результатами поляризационно-оптического метода являются фото- и видеоизображения. На таких изображениях в строго количественной интерпретации нуждаются напряжения модельного материала, выраженные оттенками определенных цветов. Необходимо учитывать, что фотографии делаются при различных внешних условиях: освещении, влажности, разных коэффициентах преломления стенок модельной емкости, различными фотокамерами. Таким образом, средство анализа должно «уметь» разлагать изображение на цвета, вычислять интенсивность каждого цвета и иметь некий «эталон интенсивности цветов» для независимости от внешних условий. В связи с этим автор работы принял участие в создании программного продукта Vlad NumGraph. Продукт успешно апробировался при интерпретации экспериментов. Программный продукт соответствует всем вышеприведенным требованиям. Последнее требование достигается контролем соотношения четырех эталонных цветов в конкретных внешних условиях, при которых производится съемка эксперимента. Это белый, красный, синий и зеленый цвета, оцифрованные по RGB-модели с 256-разрядной интенсивностью цветов (0–255).

ГЛАВА 2. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ МГС

2.1. Реологическая модель. Известно, что в земной коре на глубине 6–20 км хрупкие деформации сменяются пластическими (Вашилов, 1984; Иванов, 1970, 1990). При этом в пределах хрупкой коры флюид находится в открытых трещинах под гидростатическим давлением, а ниже – в изолированных полостях и порах в условиях максимального литостатического давления. На **рис. 1** показан возможный интервал ПХП.

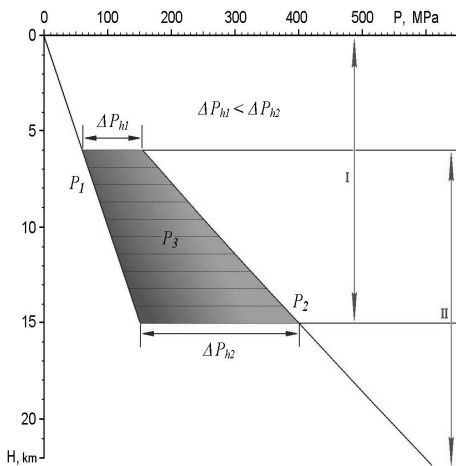


Рис. 1. Соотношение литостатического и гидростатического давлений с глубиной в связи с реологией земной коры (по Киссину, 2001 с дополнениями). P_1 – гидростатическое давление флюида в трещинах в области хрупкого состояния пород; P_2 – давление флюида в порах, равное литостатическому в области пластического состояния; P_3 – зона перехода от P_1 к P_2 , в зависимости от физических свойств пород. На разных глубинах различия и перепад давлений. I – зона открытой трещиноватости в области хрупких деформаций; II – зона закрытой трещиноватости

В верхней, хрупкой и трещиноватой части земной коры, растворы находятся под собственным гидростатическим давлением и при плотности флюида 1.0 г/см^3 график давления будет соответствовать линии P_1 . Реальные давления могут отличаться на величину, пропорциональную снижению плотности флюида с глубиной вследствие температурного разуплотнения. Линией P_2 показано возможное давление флюида в условиях пластичности пород в изолированных порах и трещинах. Давление определяется литостатической нагрузкой и зависит от плотности пород в интервале от поверхности до глубины локализации трещинно-поровой флюидной системы.

2.2. Механизм движения полостей в пластичной среде. Давление флюида, находящегося в замкнутом поровом пространстве ниже переходной зоны, соответствует литостатическому давлению, но оно должно существенно превышать таковое в голове протяженных по вертикали полостей. Чем протяженнее полость, тем значительнее должна быть разница между литостатическим и флюидным давлением сверху полости; эту разницу будем называть избыточным давлением флюида (ИДФ) (**рис. 2**).

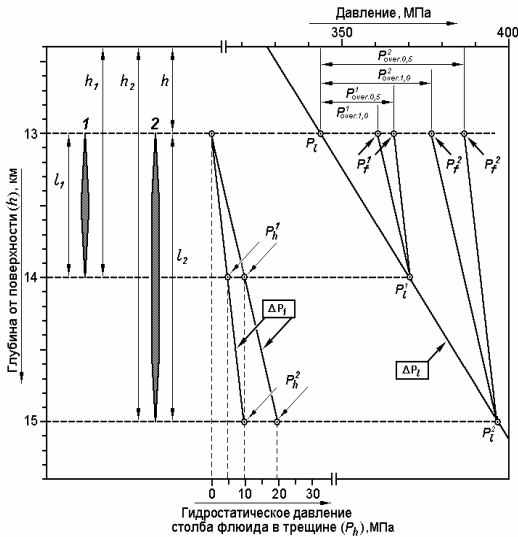


Рис. 2. Схематическая диаграмма (по Жатгуеву, 2005), поясняющая образование ИДФ.

h – расстояние от поверхности земли до головной части полостей 1 и 2; h_1 – до хвостовой (нижней) части полости 1 и h_2 – до хвостовой части полости 2; l_1 и l_2 – вертикальная протяженность полостей 1 и 2; P_h^1 и P_h^2 – гидростатическое давление столба флюида в трещинах 1 и 2 (при плотностях флюида 0.5 и 1.0 г/см³); P_l – величина литостатического давления в головной части полостей 1 и 2; P_l^1 и P_l^2 – величины литостатических давлений в хвостовой части полостей 1 и 2 (при плотности породы 2.7 г/см³); $P_{over.1.0}^1$ и $P_{over.0.5}^1$ – величина избыточного давления флюида в головной части полости 1 при плотностях флюида 1.0 и 0.5 г/см³; $P_{over.1.0}^2$ и $P_{over.0.5}^2$ – величина избыточного давления флюида в головной части полости 2 при тех же плотностях флюида; P^1 и P^2 – абсолютные давления

2.3. Сценарии эволюции МГС. Вне зависимости от глубины расположения, ПХП флюида на стенках полостей 1 и 2 в головной части при плотностях флюида 1.0 и 0.5 г/см³ играет важную роль в локализации магматических очагов, рудно-магматических комплексов и геотермальных месторождений. При изучении земной коры сверхглубокими скважинами и с помощью микросейсмического просвечивания наблюдаются зоны (участки, блоки, горизонты) с контрастными петрофизическими свойствами пород. Это связано с наличием на различных глубинах, вплоть до 10–12 км (Кольская сверхглубокая..., 1984), зон разуплотнения пород, насыщенных газово-жидкими флюидами. В зависимости от свойств пород МГС, возбуждаемые магматическим очагом, могут развиваться согласно трем сценариям (**рис. 3**).

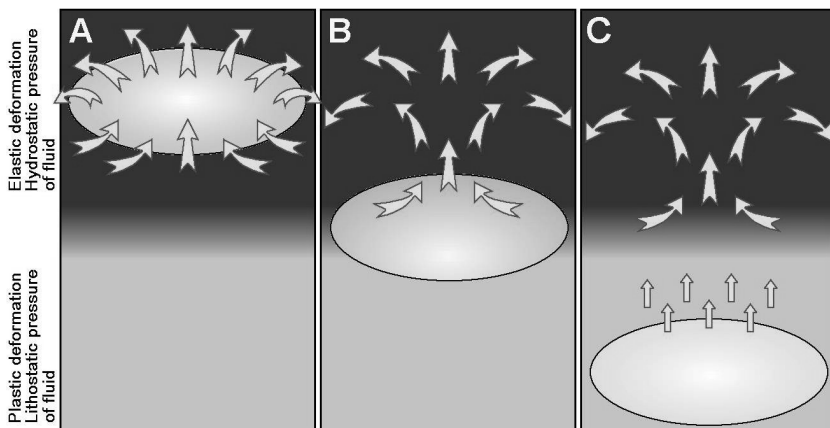


Рис. 3. Внедрение магматических очагов в разные реологические зоны земной коры и схемы развития конвективных потоков гидротерм в зависимости от положения источника тепла. А – локализация очага магмы в зоне хрупких деформаций; В – локализация магмы на границе между зонами упругих и пластических деформаций; С – локализация магматического очага в зоне пластических деформаций. Большими стрелками показана конвекция растворов в зоне хрупких деформаций, маленькими – кондуктивный тепловой поток от магматического резервуара, расположенного в зоне пластичности пород.

В первом случае магматический очаг «промывается» гидротермальными растворами, смешивая свое вещество с метеорным. Во втором случае медленное остывание нижней части массива не позволяет его веществу смешиваться с поверхностными водами. В третьем случае кондуктивное остывание интрузива приводит к формированию пегматитов, жильных тел и отделения и миграции магматических флюидов по механизму миграции флюидозаполненных полостей. В области хрупкости пород в то же время могут формироваться низкотемпературные МГС вследствие кондуктивного прогрева геологической среды, и эти системы отличаются сугубо метеорным составом растворов.

ГЛАВА 3. МОДЕЛЬ ПОДЪЕМА ФЛЮИДА ЧЕРЕЗ ПХП

3.1. Описание модели. Очевидно, что граница пластичной и хрупкой сред, которая имеет резко различные давления флюида и петрофизические свойства пород в своей верхней и нижней части, является принципиальным геохимическим барьером. Наша модель позволяет оценить эволюцию флюида и вмещающих пород на этом геохимическом барьере. При переходе к реальным значениям глубины, давления и плотностей и при учете температурных условий были разработаны различные варианты эволюции заполняющего полости флюида. На их основе построены шесть модельных сценариев массопереноса для многорезервуарной термодинамической модели подъема глубинного флюида к поверхности через ПХП. Глубины ПХП приняты равными 5 км (сценарии 1–3), 6,6, 6,9 и 8 км (сценарии 4–6) при локализации магматического очага на глубине 8 км. Сценарии характеризовались различной удаленностью тренда вертикального подъема флюида от оси магматического очага и,

соответственно, различным перепадом плотности и давления флюида. В зоне пластических деформаций флюид, находящийся под литостатическим давлением, последовательно поднимался до границы ПХП. В зоне хрупких деформаций последовательный проточный реактор усложнялся привнесом метеорных вод из открытых трещин под гидростатическим давлением. Набор независимых компонентов модели отвечал системе Si–Al–Fe–Mg–Ca–Na–K–H–O–C–Cl–S. Составы резервуаров рассчитывались как андезитобазальтовые (Богатиков и др., 1987). Состав исходного флюида был принят аналогичным составу глубинных термальных вод о. Кунашир по (Справочник по геохимии, 1990). Состав метеорных вод был усреднен из данных по составам морской воды со средней соленостью 35%. Термодинамическое моделирование проводилось на базе ПК «Селектор». При расчетах использовался метод последовательного проточного реактора для группы подвижных фаз «раствор + газ». Равновесия в резервуарах рассчитывались методом минимизации энергии Гиббса.

3.2. Результаты моделирования. Главным результатом моделирования явилось подтверждение геохимического барьера ПХП и определение форм осаждения вещества флюида. На **рис. 4, 5 и 6** показаны соответственно расчетные изменения масс свободного флюида, фазы водного раствора и газовой фазы в зависимости от глубины. Показательно изменение концентраций компонентов фазы водного раствора.

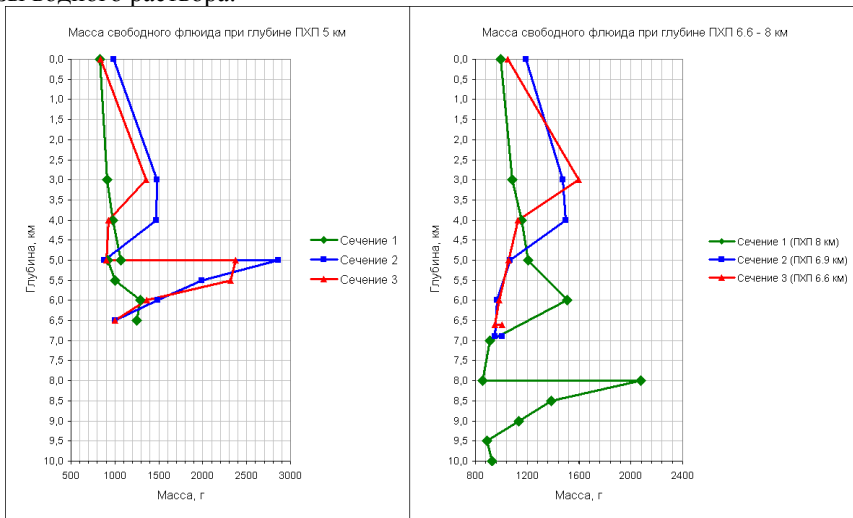


Рис. 4. Расчетное изменение массы свободного флюида по глубине.

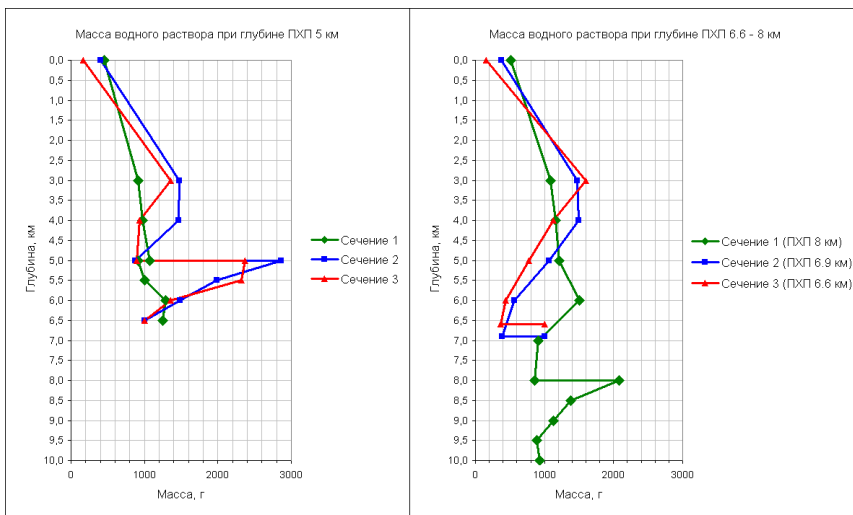


Рис. 5. Расчетное изменение массы водного раствора по глубине.

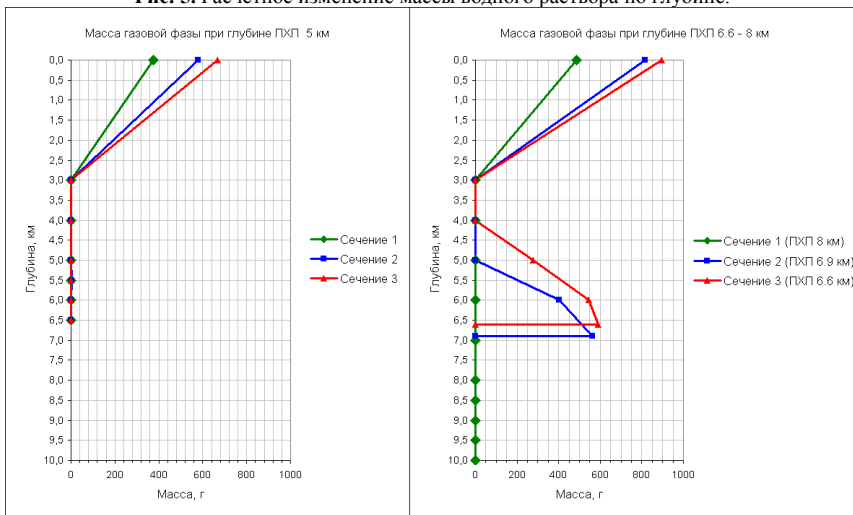


Рис. 6. Расчетное изменение массы газовой фазы по глубине.

Наибольшее падение концентраций характерно для растворенных форм HCl , SiO_2 , SO_2 , H_2S , CO_2 , NaOH , CO , KCl и NaHSiO_3 . Приблизительно на одном уровне остаются концентрации O_2 , SO_3^{2-} , MgCl^+ и HCO_3^- . Концентрации в растворе FeO_2^- , FeOH^{2+} , FeCl_2 и SO_4^{2-} на геохимическом барьере ПХП, напротив, возрастают. Содержание минералов во вмещающей породе при прохождении флюида через геохимический барьер ПХП также изменяется. Во всех сценариях отлагаются α -кварц, кристобалит, халцедон или тримит. Первый сценарий характеризуется интенсивным гидротермальным изменением пород в зоне ПХП. Значительно повышается содержание ставролита, появляются Fe-хлорит,

пектолит и гейландит; исчезает альбит и гематит. Во втором и третьем сценариях интенсивно отлагаются цеолиты, например, К-На-мерлиноит; ставролит и пектолит растворяются, магнетит сменяется гематитом. Четвертый сценарий на геохимическом барьере качественно повторяет первый, отличаюсь интенсивностью и исчезновением диопсида, а в пятом и шестом сценариях, при качественном сходстве со вторым и третьим, содержание диопсида изменяется мало (на 2–3%).

3.3. Основные выводы: 1) ПХП является принципиальным геохимическим барьером, расположенным геометрически ниже конвективной ячеи МГС и, наряду с расположением магматического очага, определяет как исходный состав всей системы, так и режим поступления в нее глубинного вещества; 2) Переход от литостатического к гидростатическому давлению, при прорыве из зоны пластичности в зону хрупкости, приводит к адиабатическому расширению флюида со значительным охлаждением и осаждением растворенного вещества.

Поэтому зона перехода пород из пластичного состояния к хрупкому отличается интенсивным вторичным минералообразованием (окремнением пород и залечиванием пустот, пор и трещин тридимитом, кристобалитом, опалом, халцедоном и кварцем). При таком сбросе флюида из трещин происходит резкое снижение его плотности. Перепад плотности флюида меняется в зависимости от глубины ПХП.

ГЛАВА 4. КОМПЛЕКСНАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ МГС

Согласно методике, на *геометрическом этапе* моделирования был определена размерность модели и размер системы – двумерный вертикальный разрез МГС, включающий зоны: нижнюю – пластических деформаций, верхнюю – хрупких деформаций и магматический очаг, находящийся на разной глубине согласно концептуальным сценариям. Система считалась симметричной относительно оси магматического очага, поэтому мы ограничились полуплоскостью с четырьмя вертикальными сечениями на глубину 20 км. В каждом из четырех сечений было определено 20 подсистем размером 1×1 км. Глубина ПХП принята равной 8 км. На *физическом этапе* были рассчитаны распределение температурных полей (**рис. 7**), гидростатическое давление для хрупкой зоны и литостатическое – для пластичной (**рис. 8**). Плотность флюида рассчитывалась по эмпирическому уравнению, полученному экспоненциальной аппроксимацией усредненных данных для воды и растворов углекислоты (Burnham etc., 1969; Рид и др., 1982): $\rho^{fluid} = 1.0616e^{-0.0017T}$. (4.2)

На *физико-химическом этапе* был определен набор независимых компонентов модели (система Si–Al–Fe–Mg–Ca–Na–K–H–O–C–S–Cl–F–Zn–Cu–Pb–Sn). Термодинамическое моделирование проводилось на базе ПК «Селектор». Исходные равновесные парагенезисы с водным раствором и газовой фазой рассчитывались методом минимизации энергии Гиббса. В целом по первому сценарию расчет показал возможность равновесного существования 50 минералов, 4 компонентов газовой фазы и 97 компонентов водного раствора (для хрупкой зоны); и 24 минералов, 2 компонентов газовой фазы и 96

компонентов водного раствора (для пластичной зоны). По второму сценарию способны равновесно существовать 46 минералов, 5 компонентов газовой фазы и 91 компонента водного раствора (для хрупкой зоны); и 35 минералов, 9 компонентов газовой фазы и 106 компонентов водного раствора (для пластичной зоны). По третьему сценарию определились 29 минералов и 73 компонента водного раствора (для хрупкой зоны, газовая фаза отсутствует); и 39 минералов, 11 компонентов газовой фазы и 106 компонентов водного раствора (для пластичной зоны).

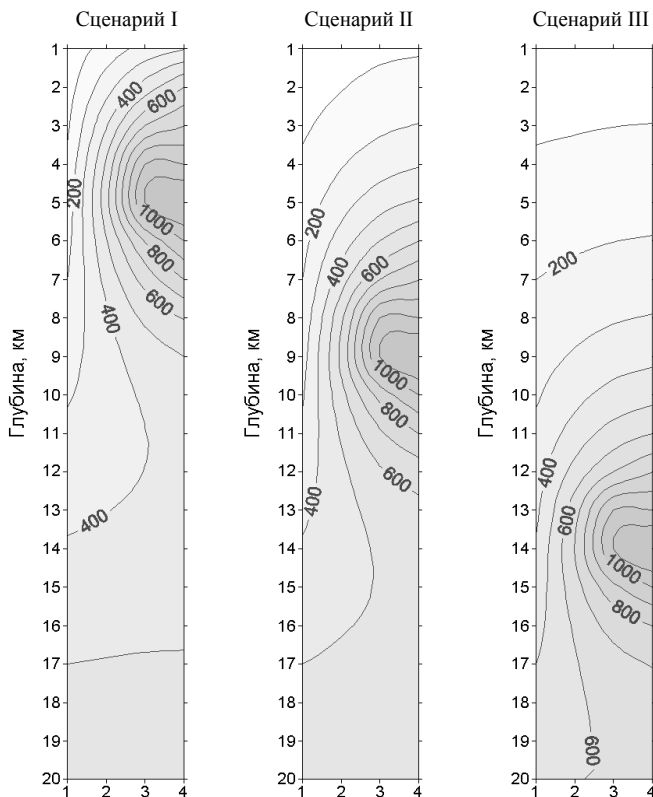


Рис. 7. Расчетное распределение температуры (°C) в модельной плоскости.

Для всех фаз и зависимых компонентов были построены пространственные и P-T-диаграммы содержаний. Практически все диаграммы показывают резкую смену минеральных парагенезисов, составов раствора и газов на геохимическом барьере ПХП. Области наибольшего содержания свободного флюида (рис. 9) локализируются преимущественно в нижней, пластичной зоне и в зоне магматического очага в двух первых сценариях – при его внедрении в хрупкую среду, что свидетельствует о присутствии некоторого количества расплава. Максимальные содержания газовой фазы флюида и области концентраций

зависимых компонентов водного раствора флюида приурочены к зонам магматического очага.

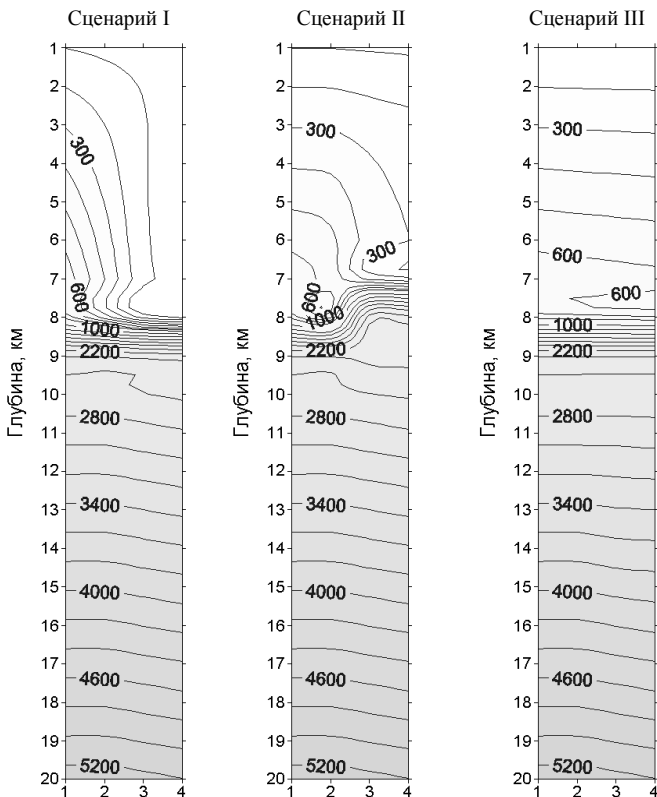


Рис. 8. Расчетное распределение полей давления (бар) в модельной плоскости.

В хрупкой зоне изобары проведены через 100 бар, в пластичной зоне – через 200 бар.

Распределение компонентов твердых фаз контролируется геохимическим барьером ПХП и P-T-условиями подсистем. Минералы кремнезема в системе представлены α -кварцем (**рис. 10**), тридимитом, кристобалитом, халцедоном и аморфным кремнеземом, причем в нижней, пластичной зоне равновесен только аморфный кремнезем в небольших количествах. Остальные минералы кремнезема равновесны выше геохимического барьера ПХП. Полевые шпаты представлены, в основном, плагиоклазами и микроклином. По равновесным содержаниям альбита и анортита можно судить о номере плагиоклазов в той или иной подсистеме. Альбит характерен для хрупкой зоны, анортит же приурочен к подсистемам магматического очага. Максимальные содержания альбита – до 44 масс. %, анортита – до 28 масс. %. Микроклин существует на глубинах 13–18 км (до 12 масс. %), и точно – в хрупкой зоне (до 8 масс. %). В периферийных частях магматического очага равновесен гематит (до 8 масс. %), в меньших количествах он присутствует в зоне хрупких деформаций (до 2.5 масс. %).

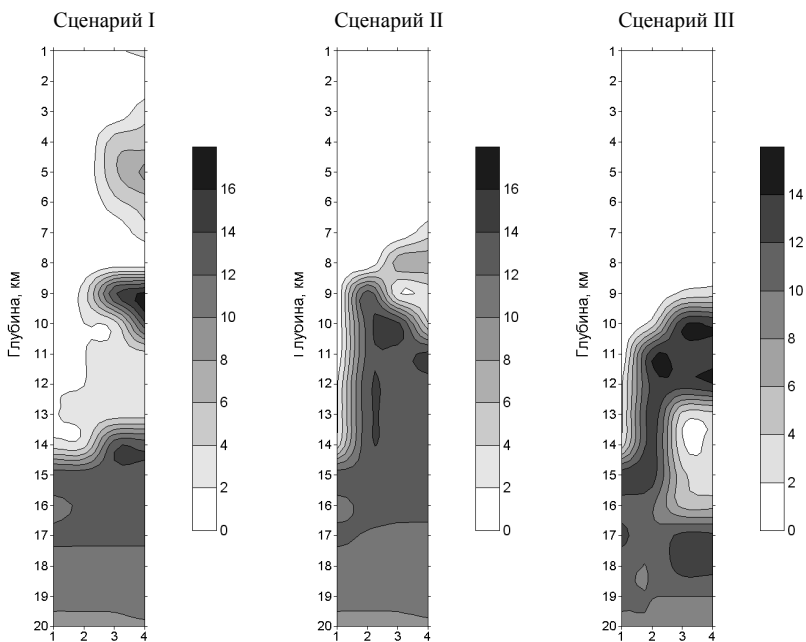


Рис. 9. Расчетные диаграммы распределения свободного флюида, масс. %.

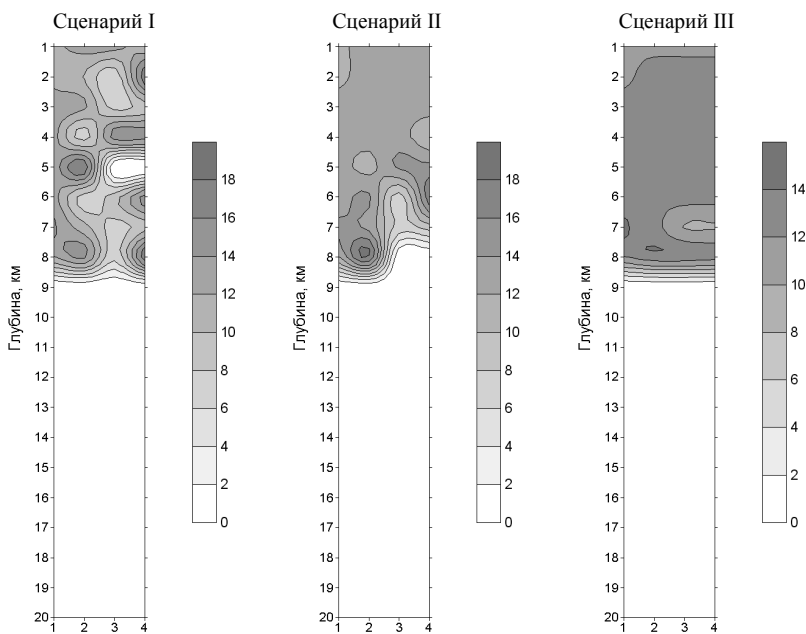


Рис. 10. Расчетные диаграммы распределения α -кварца, масс. %

Пироксены представлены эгирином, геденбергитом, диопсидом. Эгирин равновесен в пластичной зоне (до 14 масс. %), геденбергит – на средних глубинах (до 5.4 масс. %), причем их изоконцентраты огибают магматический очаг снаружи, не пересекая его границы. Среди амфиболов отметим антофиллит, о составе которого можно судить по содержаниям крайних членов изоморфного ряда: Fe-антофиллит – до 4 масс. % и Mg-антофиллит – до 15 масс. %. Флюорит разных модификаций характерен практически для всей системы; его распределение сложно интерпретировать. В первом сценарии он частично отсутствует непосредственно под геохимическим барьером ПХП и на глубинах 16–17 км, во втором – на глубинах 9–17 км, в третьем – в области между магматическим очагом и линией ПХП. Максимальные содержания флюорита – до 0.12 масс. %. В средне- и низкотемпературных областях зоны хрупких деформаций равновесны некоторые цеолиты, например, пумпеллиит. Из рудных минералов отметим халькозин, существование которого строго контролируется положением магматического очага (**рис. 11**).

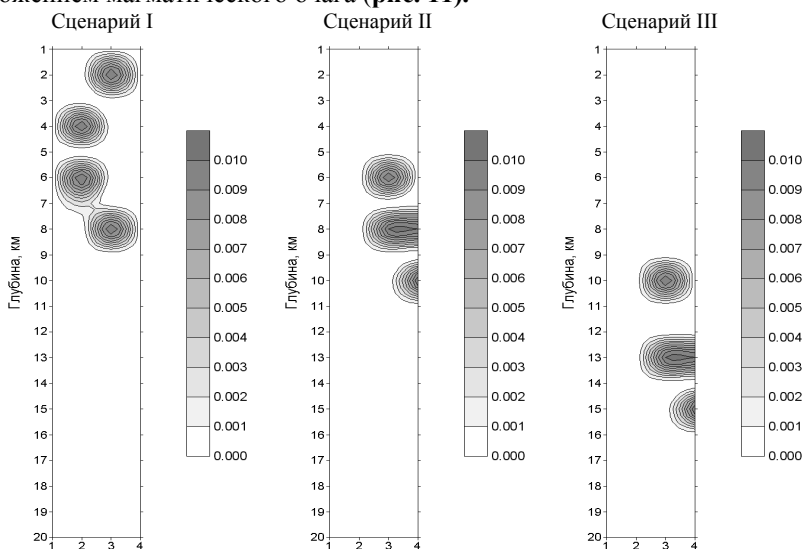


Рис. 11. Расчетные диаграммы распределения халькозина, масс. %.

Таким образом, указанные этапы моделирования позволили детально описать исходные распределения температуры и давления системы, получить равновесные минеральные парагенезисы с водным раствором и газовой фазой для каждой подсистемы модели, а также определить факторы, влияющие на распределение того или иного компонента системы.

На *динамическом этапе* использовался метод последовательного проточного реактора для группы подвижных фаз (раствор + газ) с 12 резервуарами в каждом сценарии, расположенными на траектории движения флюида в конвективной ячее МГС зоны хрупких деформаций. Модель усложнялась привнесом в первый резервуар глубинного флюида, подъем которого через пластичную среду по

предложенному механизму был рассчитан ранее (глава 3), а также привнесом в приповерхностные резервуары метеорного раствора и выносом флюида на поверхность (рис. 12).

Сценарий 1					Сценарий 2					Сценарий 3				
	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4
1		0			1		0	0		1		0		
2			7		2			7	6	2			7	
3	8			6	3	8				5				
4	9		5		4	9				4				
5	10			4	5	10				3				
6	11			3	6	11				2				
7		12	2		7		12	1		7		12	2	
8				1	8					8			1	
9					9					9				
10					10					10				
11					11					11				
12					12					12				
13					13					13				
14					14					14				
15					15					15				
16					16					16				
17					17					17				
18					18					18				
19					19					19				
20					20					20				

Рис. 12. Схемы сценариев динамической модели. Цифрами в сетке даны номера резервуаров. Нулевые значения – внешняя среда. Глубинный флюид (0 внизу) попадает в первый резервуар (1), далее развивается сценарий проточного реактора, то есть перемещение группы подвижных фаз из резервуара в резервуар (1–12). Массообмен с поверхностью происходит в первом и третьем сценариях через седьмой резервуар (внешняя среда 0), во втором сценарии – через шестой и седьмой резервуары. Конвективные ячее сценариев расположены в хрупкой зоне, в первом и втором сценариях они захватывают трещиноватые части магматических очагов.

Равновесия рассчитывались методом минимизации энергии Гиббса. Расчет производился до установления стационарного распределения вещества в конвективной ячейе МГС (прекращения изменения составов резервуаров) при фиксированных Р-Т-условиях. После установления стационарного распределения вещества в конвективной ячейе МГС расчет показал возможность равновесного существования в резервуарах первого сценария 48 минералов, 10 компонентов газовой фазы и 68 компонентов водного раствора. В резервуарах второго сценария расчет выявил 36 минералов, 5 компонентов газовой фазы и 71 компонент водного раствора. В резервуарах третьего сценария определились 27 минералов и 63 компонента водного раствора (газовая фаза отсутствует). Для компонентов были построены диаграммы изменения содержаний в зависимости от глубины и Р-Т-условий. Поведение флюида в резервуарах опишем в виде диаграмм изменения содержания в нем независимых компонентов для первого и двенадцатого резервуаров каждого сценария относительно исходного флюида. Для первого и второго сценариев – это диаграммы изменения составов фазы водного раствора и газовой фазы, для третьего – только фазы водного раствора, так как газовая фаза в его резервуарах отсутствует. Последний результат можно объяснить относительно малыми температурами в зоне хрупких деформаций третьего сценария (66–291°C) при давлениях 195–724 бар. Заметим, что фазовый анализ (раствор/газ) в нашем случае очень сложен, кривая кипения флюида переменного в зависимости от Р-Т-условий состава может быть проверена только экспериментально, что выходит за рамки нашей работы. На рис. 13, 14 и

15 показаны соответственно диаграммы изменения составов водного раствора для 1–3 сценариев.

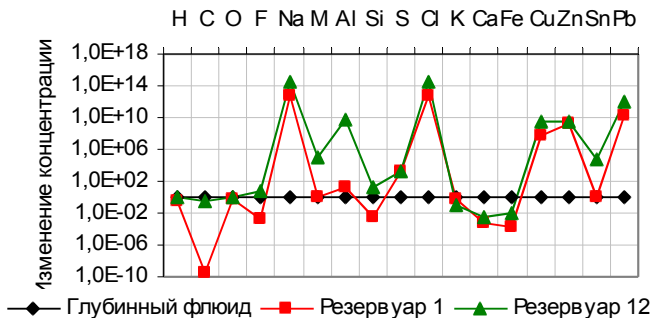


Рис. 13. Изменение концентрации независимых компонентов фазы водного раствора в первом и последнем резервуарах конвективной ячейки МГС по первому сценарию относительно глубинного флюида, мг/кг H_2O .

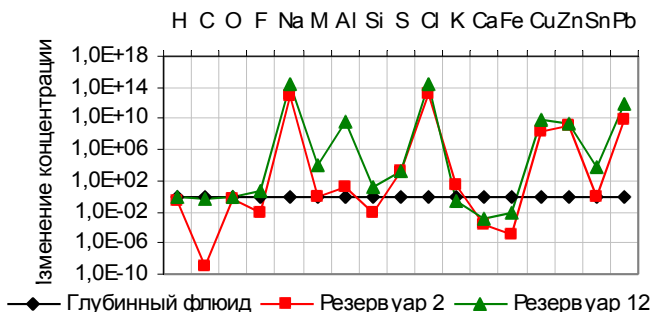


Рис. 14. Изменение концентрации независимых компонентов фазы водного раствора в первом и последнем резервуарах конвективной ячейки МГС по второму сценарию относительно глубинного флюида, мг/кг H_2O .

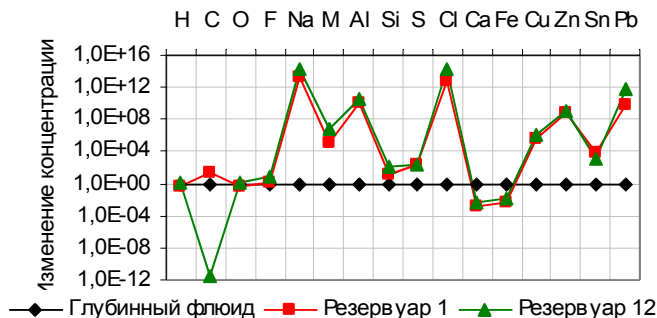


Рис. 15. Изменение концентрации независимых компонентов фазы водного раствора в первом и последнем резервуарах конвективной ячейки МГС по третьему сценарию относительно глубинного флюида, мг/кг H_2O .

Изменения в минеральном составе вмещающей среды в резервуарах были описаны в виде расчетных диаграмм сравнения содержания компонентов в разных сценариях. Показательно, например, поведение α -кварца (рис. 16) и магнезиального хлорита (рис. 17).

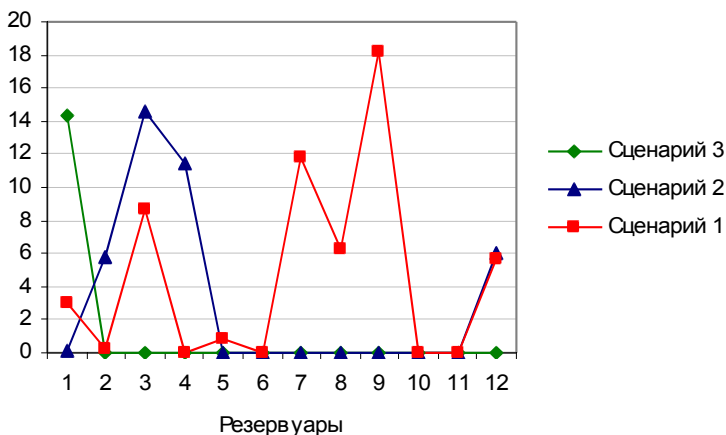


Рис. 16. Диаграмма распределения α -кварца, масс. %

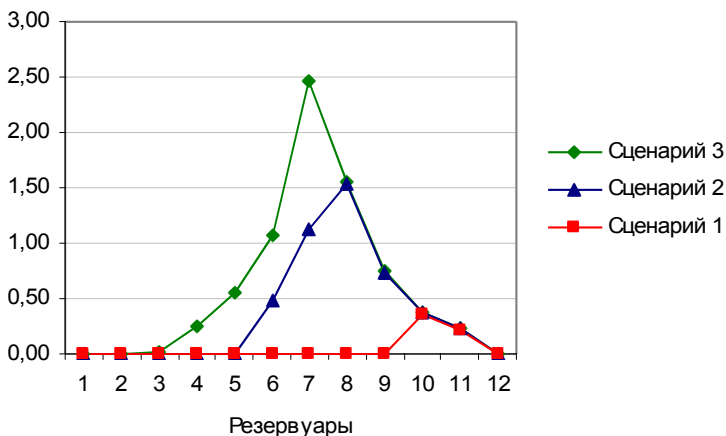


Рис. 17. Диаграмма распределения Mg-хлорита $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$, масс. %.

Разработанная комплексная компьютерная модель МГС вблизи зоны (ПХП) с учетом привноса глубинного флюида и взаимодействия с метеорным раствором позволила выявить основные закономерности существования МГС в данной реологической обстановке, определить роль ПХП и магматического очага в эволюции вещественного состава системы, локализовать области концентрации

породообразующих и рудных компонентов, а также сделать следующие *выводы*:

1. Моделирование показало, что активно участвуют в самоизоляции МГС коллоидные соединения кремнекислоты, высаживающийся на ПХП силикагель и образующиеся из него минералы кремнезема – опал, тримит, кристобалит, халцедон и кварц. Такой механизм взаимодействия «вода–порода» реализуется в геотермальных процессах в недрах Северо-Парамуширской магматогенно-гидротермальной системы (Рычагов и др., 2002). Как показало бурение скважины ГП-3 до глубины 2,5 км, над интрузивным телом габбро-диоритов образуется зона кипения металлоносных гидротерм, которое приводит к осаждению в пористых вулканогенно-осадочных породах силикатного геля с последующей раскристаллизацией его в минералы кремнезема.
2. Натурные и теоретические исследования (Вашилов, 1984; Corbett, Leach, 1998; Рычагов, Белоусов, 2002; Рычагов, 2003 и многие другие) показывают хорошее соответствие природной фактуры с расчетными данными. Несмотря на то, что внедрение полифазной интрузии происходит в пределах верхней части земной коры, здесь за счет длительной эволюции сложного магматического тела реализуются механизмы сценариев 1 и 2 и, возможно, частично сценария 3.
3. Расчетной зоне ПХП от остывающего магматического тела к вмещающим горным породам соответствует и так называемая «брекчиевая мантия» (Рычагов, 1989) – комплекс различного типа брекчиевых образований (от интрузивных и автомагматических до гидротермальных и метасоматических брекчий) в эндо- и экзоконтактных частях интрузий.

ГЛАВА 5. ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ ФЛЮИДА

Цель главы – физическая проверка состоятельности гипотезы движения флюидозаполненных полостей в пластичной среде.

5.1. Подготовка экспериментов. В разделе описываются решения следующих задач: подбор модельной среды (различные составы на основе желатиновых студней), подбор модельного флюида (эфир или этанол), определение способа получения напряжения среды, определение способа формирования полости в модельной среде, учет условий подобия, определение конфигурации частей модельной установки, подбор источника света, выбор способа фиксации изображений экспериментов.

5.2. Описание экспериментов. В данной работе результаты многочисленных проведенных экспериментов показаны на двух примерах. Первый эксперимент (рабочий номер 1-28) показал эволюцию полости при постоянной подаче двухфазного модельного флюида в модельную среду с боковыми стрессовыми напряжениями. Второй эксперимент (3-16) позволил наблюдать независимую эволюцию полости в двухслойной модельной среде с пластичным нижним и хрупким верхним слоями, что хорошо проиллюстрировано в данном разделе.

5.3. Основные выводы. Эксперименты, проведенные в 2006–2011 гг. позволили уверенно обосновать гипотезу миграции флюидозаполненных полостей. В

гравитационном поле в пластической вмещающей среде происходит миграция флюидозаполненных полостей по механизму гидроразрыва, скорость которой зависит от величины избыточного давления. Для начала миграции полостей необходима критическая высота полости, обеспечивающая критическое ИДФ, равное прочности породы. Траектория движения зависит от напряженного состояния среды, в которой процесс развивается. Полость при движении стремится в зону растягивающих напряжений. При наличии барьеров, прочность на разрыв которых превышает величину ИДФ в полости, последняя некоторое время распространяется по латерали до момента понижения избыточного давления до уровня прочности вмещающей среды. На основе анализа более семидесяти экспериментов было рассчитано среднее критическое ИДФ, необходимое для гидроразрыва модельной среды: 375.39 Па. Средняя критическая длина полости в модели составляет 6.01 см, что при природной прочности пород 130 кПа соответствует ~42.84 м, а при прочности 3 МПа соответствует ~988.59 м.

Кроме этого, следует отметить, что программный продукт Vladi NumGraph успешно апробирован в интерпретации результатов экспериментов и может быть использован в исследованиях независимо от освещения, свойств модельных материалов и типа регистрирующих аппаратов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По существу проведенных исследований можно сделать выводы:

1. В структуре длительно живущих рудообразующих МГС островных дуг создаются особые реологические условия в форме пластично-хрупких переходов геологической среды. ПХП являются геохимическими барьерами, которые регулируют образование МГС, их связь с источниками теплового питания (магматическими очагами), а также протекание физико-химических процессов в зоне эволюции конвективной ячеи МГС.
2. Предложено три сценария (модели) формирования циркуляционных МГС, в зависимости от локализации магматического источника тепла относительно ПХП и частичного или полного внедрения магматических расплавов в область хрупких деформаций земной коры.
3. В изолированных полостях, заполненных флюидом, возникает избыточное давление, зависящее от плотности флюида, протяженности полостей и от величины литостатического давления. В гравитационном поле в пластической вмещающей среде происходит миграция флюидозаполненных полостей по механизму гидроразрыва, скорость которой зависит от величины избыточного давления. Для начала миграции необходима критическая высота полости, обеспечивающая критическое избыточное давление, равное прочности породы на растяжение. Траектория движения зависит от напряженного состояния среды, в которой процесс развивается. Полость при движении отклоняется в зону растягивающих напряжений, избегая зоны напряжений сжатия. При наличии барьеров, прочность на

разрыв которых превышает величину избыточного давления в полости, последняя некоторое время распространяется по латерали до момента понижения избыточного давления до уровня прочности вмещающей среды.

4. Переход от литостатического к гидростатическому давлению при вступлении полости в хрупкие породы приводит к адиабатическому расширению флюида, резкому снижению его плотности и охлаждению растворов (часто сопровождающемуся вскипанием), а также к вторичному минералообразованию. Поэтому зоны переходов от литостатического к гидростатическому давлению трассируются интенсивным вторичным минералообразованием, в частности, окремнением пород и залечиванием трещинно-порового пространства тридимитом, кристобалитом, опалом, халцедоном и кварцем в ассоциации с адуляром, цеолитами и другими минералами. В кварц-адуляровых метасоматитах и зонах аргиллизации пород образуется рудно-сульфидная минерализация, высаживаются самородные металлы и рудные соединения.
5. На основании сравнения полученных расчетных данных с данными комплексных геолого-геофизических, гидрогеологических, минералого-геохимических и других исследований МГС Южной Камчатки и острова Парамушир показано высокое соответствие модели внедрения магматических расплавов в хрупкую земную кору строению современных высокотемпературных МГС (прогрессивного этапа развития) на глубинах более 1.0–1.5 км, и рудоносных вулканоплутонических комплексов миоцен-плиоценового возраста, эродированных на различную глубину в разных геологических блоках. В структуре вулканоплутонических комплексов зоной хрупко-пластического перехода служит брекчиевая мантия (Рычагов, 1989) интрузивных габбро-диоритовых тел, контролирующая потоки высокотемпературных металлоносных газо-водных флюидов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах:

1. Васильев В.И., Чудненко К.В., Жатнуев Н.С., *Васильева Е.В.* Комплексное компьютерное моделирование геологических объектов на примере разреза зоны субдукции // Геоинформатика, №3, 2009. – С. 15–30.
2. Васильев В.И., Жатнуев Н.С., Рычагов С.Н., *Васильева Е.В.*, Санжиев Г.Д. Массоперенос и минералообразование в магматогенно-гидротермальных системах по результатам численного физико-химического моделирования // Литосфера, №3, 2010. – С. 145–152.
3. Жатнуев Н.С., Рычагов С.Н., Васильев В.И., *Васильева Е.В.* Влияние реологических свойств земной коры на локализацию рудообразующих гидротермально-магматических систем // Вулканология и сейсмология (принята в печать 19.09.2011).

Публикации в материалах научных мероприятий:

1. *Васильева Е.В.*, Васильев В.И., Жатнуев Н.С. Тектонофизическое моделирование динамики флюидосодержащих трещин в литосфере // Материалы Всероссийской конференции с иностранным участием «Геохимия и рудообразование радиоактивных, благородных и редких металлов в эндогенных и экзогенных процессах», посвященной 50-летию СО РАН и 80-летию чл.-корр. РАН Ф.П. Кренделева, г. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2007. – С.122–125.

2. **Васильева Е.В.**, Васильев В.И. Эволюция флюидозаполненных трещин в литосфере по результатам тектонофизического моделирования // Современные проблемы геологии, геохимии и геоэкологии Дальнего Востока России. Материалы II региональной конференции. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – С. 111–113.
3. **Васильева Е.В.**, Васильев В.И., Жатнуев Н.С. Миграция флюидозаполненных трещин в литосфере по результатам тектонофизического моделирования // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы всероссийского совещания. Вып. 6. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2008. Т. 1. – С. 54–55.
4. Жатнуев Н.С., Тубанов Ц.А., **Васильева Е.В.** Упруго-пластичный переход как концентратор напряжений в земной коре // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия: Материалы всероссийского совещания. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. – Т. 2. – С. 22–23.
5. Васильев В.И., Жатнуев Н.С., **Васильева Е.В.** Численная термодинамическая модель подъема флюидозаполненных трещин через зону пластично-хрупкого перехода // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы всероссийского совещания. Вып. 7. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. – Т.1. – С. 48–50.
6. Жатнуев Н.С., **Васильева Е.В.** Трещинно-флюидный механизм мантийных плюмов // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы всероссийского совещания. Вып. 7. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2009. – Т.1. – С. 104–106.
7. **Васильева Е.В.**, Васильев В.И., Санжиев Г.Д. Процесс миграции флюидозаполненных трещин в литосфере по результатам тектонофизического моделирования // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы всероссийского совещания. Вып. 8. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2010. – Т. 1. – С. 46–47.
8. Васильев В.И., **Васильева Е.В.** Использование комплексной методики для компьютерного моделирования распределения тепла и вещества в зонах субдукции // Геохимия, петрология и рудоносность базит-ультрабазитовых комплексов: Материалы II всероссийской молодежной школы-семинара. – Иркутск: ИГХ СО РАН, 2010. – С. 19–21.
9. Жатнуев Н.С., **Васильева Е.В.** Трещинно-флюидный механизм мантийных плюмов // Геохимия, петрология и рудоносность базит-ультрабазитовых комплексов: Материалы II всероссийской молодежной школы-семинара. – Иркутск: ИГХ СО РАН, 2010. – С. 14–16.
10. **Васильева Е.В.**, Жатнуев Н.С., Васильев В.И., Санжиев Г.Д. Возможность участия мантийного флюида в формировании гидротерм Байкальской рифтовой зоны по результатам тектонофизического и численного физико-химического моделирования // Геология Западного Забайкалья: Материалы всероссийской молодежной конференции. – Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2011. – С. 36–38.
11. Васильев В.И., Борхонова Е.В., Чернявский М.К., **Васильева Е.В.** Численная физико-химическая модель формирования термальных вод Горячинского месторождения // Геология Западного Забайкалья: Материалы всероссийской молодежной научной конференции. – Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2011. – С. 26–32.
12. Васильев В.И., **Васильева Е.В.** Прогноз антропогенного изменения состава термальных вод Горячинского месторождения // Геология Западного Забайкалья: Материалы всероссийской молодежной научной конференции. – Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2011. – С. 32–35.
13. Vasiliev V.I., Zhatnuev N.S., **Vasilieva E.V.**, Sanzhiev G.D. The physical and chemical computation of the conditions of oceanic plate dehydration under the subduction at rates of 1.0–5.0 cm/year // Large Igneous Provinces of Asia, Mantle Plumes and Metallogeny: Proceedings of International Symposium. – Irkutsk: IGC SB RAS, 2011. – P. 284–287.
14. Vasiliev V.I., Zhatnuev N.S., **Vasilieva E.V.**, Sanzhiev G.D. The viscosity of melt in magma pocket at the brittle-plastic border in the lithosphere // Large Igneous Provinces of Asia, Mantle Plumes and Metallogeny: Proceedings of International Symposium. – Irkutsk: IGC SB RAS, 2011. – P. 288–291.
15. **Васильева Е.В.**, Санжиев Г.Д., Васильев В.И. Поведение корового флюида на геохимическом

барьере пластично-хрупкого перехода литосферы по результатам численного физико-химического моделирования // Современные проблемы геохимии: Материалы Всероссийской молодежной конференции. – Иркутск: ИГХ СО РАН, 2011. – С. 217–221.

16. Васильев В.И., Жатнуев Н.С., **Васильева Е.В.**, Санжиев Г.Д. Численная физико-химическая модель эволюции рудоносного флюида и вмещающих гранитоидов на геохимическом барьере пластично-хрупкого перехода земной коры // Граниты и процессы рудообразования: Материалы Всероссийской конференции, посвященной памяти академика В.И. Коваленко. – Москва: ИГЕМ РАН, 2011. – С. 39–41.