

## СОСТАВ МАГМАТОГЕННЫХ ФЛЮИДОВ, ФАКТОРЫ ИХ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ И МЕТАЛЛОНОСНОСТИ

А.С. Борисенко, А.А. Боровиков, Л.М. Житова, Г.Г. Павлова

*Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия*

Основываясь на изучении флюидных и расплавных включений в минералах магматических пород и связанных с ними рудно-метасоматических образованиях, а также на данных экспериментальных исследований процессов отделения магматических флюидов от расплавов, рассмотрены возможные варианты эволюции фазового состава магмотогенных флюидов, отделяющихся от гранитоидных и базитовых расплавов на разных уровнях их глубинности. Выявлены три типа различных по составу и фазовому состоянию флюидов, которые характеризуются разной металлоносностью: 1) гомогенные надкритические; 2) гетерофазные „окисленные“ и „восстановленные“; 3) „сухие“ существенно газовые флюиды. Установлено, что наиболее высокометаллоносными являются гетерофазные флюиды, комплекс рудных элементов в которых определяется геохимической специализацией рудно-магматической системы. Полученные данные по составу газовой и жидкой фаз флюидных включений позволили сделать выводы о разной металлоносности газовой и водно-солевой фаз магмотогенных флюидов. Показано, что важнейшими факторами высокой металлоносности магмотогенных флюидов являются их гетерофазное состояние и высокая экстракционная способность каждой из их составляющих, динамика и высокие температуры отделения флюидов от расплавов (>700 °С), а также высокие концентрации рудных элементов в первичных рудоносных расплавах.

*Флюидные включения, расплавные включения, рудно-магматическая система, магмотогенные флюиды, металлоносность.*

## COMPOSITION OF MAGMATOGENE FLUIDS AND FACTORS DETERMINING THEIR GEOCHEMISTRY AND METAL CONTENTS

A.S. Borisenko, A.A. Borovikov, L.M. Zhitova, and G.G. Pavlova

Based on fluid and melt inclusion studies in magmatic rocks and related ores and metasomatites, as well as on experimental data on selection of magmatic fluids from the melts, possible evolution paths of the phase composition of magmatogene fluids separated from granitoid and basite melts at different depths have been considered. Three types of fluids have been recognized according to their composition and phase state, which differ in metal contents: (1) homogeneous supercritical, (2) heterophase "oxidized" and "reduced", and (3) "dry", essentially gas. Heterophase fluids are shown to have the highest metal contents; their set of ore elements is determined by the geochemistry of the ore-magmatic system. The obtained composition data evidence different metal contents of the gas and water-salt phases of magmatogene fluids. It is shown that the high metal contents of these fluids are due to their heterophase state, the high extraction capacity of each their component, dynamics and high temperature of fluid separation from melts (>700°C), and high concentrations of ore elements in the original ore-bearing melts.

*Fluid inclusions, melt inclusions, ore-magmatic system, magmatogene fluids, metal-bearing capacity*

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из узловых и фундаментальных проблем в разработке теоретических основ эндогенного рудообразования является выяснение условий генерации магматических флюидов, определение их состава и металлоносности. Ее решение — основа для расшифровки генезиса многих типов эндогенных рудных месторождений и во многом определяет корректность построения генетических моделей рудно-магматических систем (РМС), оценку их рудопродуктивности, выяснение главных факторов рудоносности магматических комплексов и причин их металлогенической специализации. К настоящему времени накоплен большой объем данных по этой проблеме, что позволяет существенно уточнить, а отчасти и пересмотреть имеющиеся представления о составе, металлоносности и фазовом состоянии магмотогенных флюидов. Основными источниками информации о них являются исследования вулканических газов в районах современной вулканической активности, изучение флюидных и расплавных включений в магматических породах и связанных с ними рудно-метасоматических образованиях, а также экспериментальные исследования и численное моделирование процессов отделения магматических флюидов от расплавов. Новые и весьма важные данные по составу и свойствам магмотогенных флюидов были получены в последние годы при исследовании расплавных и флюидных включений в минералах, в связи с внедрением в практику термобарогеохимических исследований современных инструментальных методов анализа: LA-ICP-MS, ионный и протонный микрозонды, сканирующая электронная микроскопия, ИК- и КР-спект-

роскопия и ряд других. Это позволило охарактеризовать фазовое состояние отделяющихся от расплавов магматогенных флюидов, особенности их макро- и микрокомпонентного солевого и газового составов, содержание рудных компонентов, оценить характер их распределения в гетерофазных системах: расплав—водно-солевая—газовая фазы. Важно также, что изучение флюидных и расплавных включений позволило выявить специфику состава флюидов на разных этапах формирования магматических комплексов и рудно-магматических систем.

### ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ФЛЮИДОВ, ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ОТ МАГМАТИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

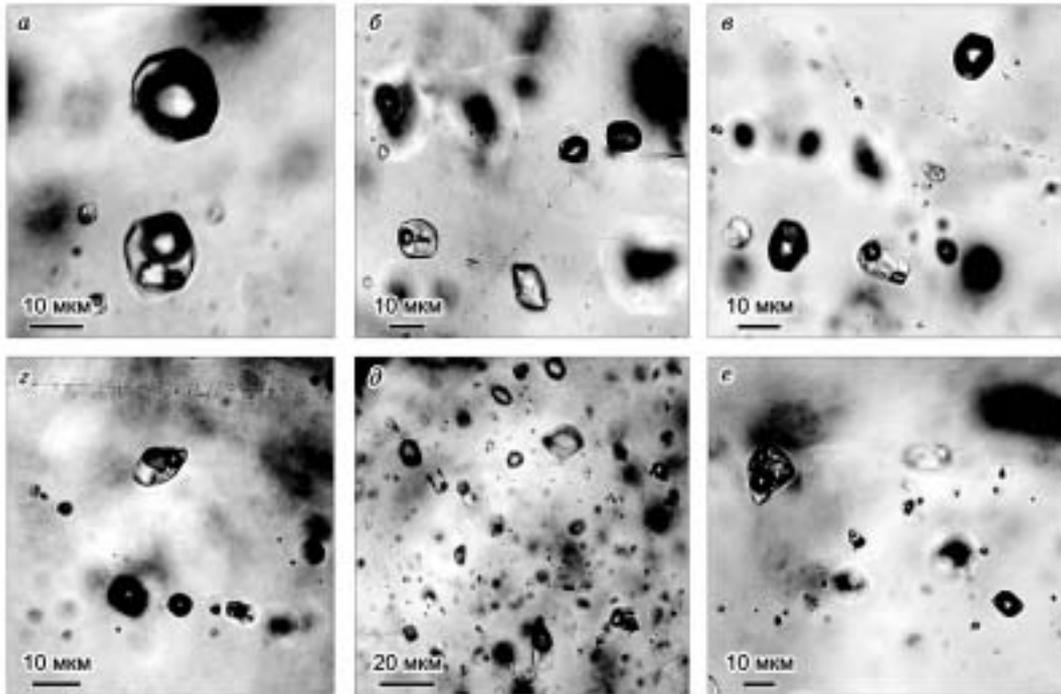
Анализ имеющихся данных изучения вулканических газов, расплавных и флюидных включений в минералах магматических пород показал, что при соответствующих *PT*-параметрах от магматических расплавов отделяются разные по составу и фазовому состоянию флюиды: 1) гомогенные надкритические ( $H_2O > MeCl_n$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$ ); 2) гетерофазные, представленные водно-солевой фазой (рассол, расплав-рассол или солевой расплав) и обособленной парогазовой фазой; 3) „сухие“ существенно газовые ( $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$  и др.).

В близповерхностных условиях при низких давлениях от расплавов отделяются гомогенные надкритические флюиды (вулканические газы), хорошо изученные в районах современной вулканической деятельности [Башарина, 1961; Меняйлов и др., 1977; Набоко, 1980; Федотов, 1984; Bernard, 1985; Gemmill, 1987; Symonds et al., 1987, 1994; Le Guern, 1988; Taran et al., 1995, 2000]. Для большинства районов fumarольные и эруптивные вулканические газы состоят на 80—96 % из паров  $H_2O$ , в меньших количествах присутствуют  $CO_2$  (0,3—8 %), соединения серы —  $H_2S$  и  $SO_2$  (до 3 %),  $HCl$  (0,1—3 %),  $HF$  (0,01—0,4 %) и другие. Содержание солевых компонентов обычно невысокое — 2—5 %. Для некоторых вулканов, например Этна, в составе вулканических газов преобладают  $CO_2$  (до 34 %) и соединения серы (до 48 %). При охлаждении и конденсации таких газов образуются кислые растворы с обособленной газовой фазой.

Магматогенные флюиды более глубинного гипабиссального уровня генерации являются исходно гетерофазными. Это достаточно убедительно показано изучением расплавных и флюидных включений в минералах магматических пород и особенно рудоносных магматических комплексов и связанных с ними рудно-метасоматических образований [Бакуменко, Косухин, 1970; Коваленко и др., 1986; Реддер, 1970, 1987; Возняк, Квасница, 1988; Наумов и др., 1990; Борисенко и др., 1997; Reif, 1997; Рейф, Ишков, 2003]. Установлено, что магматические очаги гипабиссального уровня генерируют гетерофазные флюиды, представленные фазой высококонцентрированных растворов или расплавов-рассолов (кристаллофлюидные включения) и парогазовой фазой ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$  и др.) (рис. 1). Реальность возникновения таких гетерофазных флюидов на магматическом этапе доказывается наличием комбинированных расплавных включений, содержащих в переменных количествах силикатное стекло, водно-солевую и существенно парогазовую фазы, что указывает на существование в расплаве, из которого кристаллизовались магматические породы, капель высокоплотного водно-солевого раствора или расплава-рассола и пузырьков малоплотной газовой фазы. На это же указывают и высокие, близкие к магматическим, температуры гомогенизации обособленных кристаллофлюидных включений (до 500—750 °C и выше).

Установлено [Рейф, 1984], что расплавы имели микроэмульсионное состояние и содержали субмикронные пузырьки гетерофазных флюидов, что весьма важно для экстракции из расплава рудных компонентов [Доровский, 2004]. В зависимости от *PT*-условий, плотность и концентрация солей в сосуществующих газовой и водно-солевой фазах магматического флюида существенно меняются, что можно проиллюстрировать на примере диаграммы состояния для системы  $NaCl-H_2O$  (рис. 2).

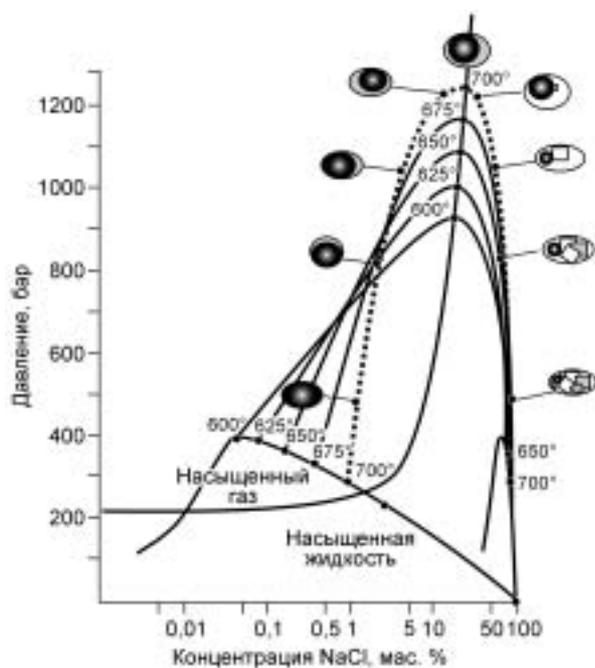
Характерно, что гетерофазные флюиды установлены для рудно-магматических систем разного геохимического профиля и связанных с магматическими комплексами разного состава: Sn-W (Ag) [Реддер, 1987; Sugaki et al., 1988; Heinrich et al., 1992, 1999; Борисенко и др., 1996, 1997; Audétat et al., 2000 a,b; Höll et al., 2000; Kamenetsky et al., 2002], Cu-Mo (Au)-порфировых [Реддер, 1987; Bodnar, 1995; Ulrich et al., 1999; Heinrich et al., 1999], Cu-Ni-Pt в расслоенных базитовых интрузиях [Ballhaus, Stumpf, 1986; Zhitova et al., 2004; Hanley et al., 2005a,b; Житова и др., 2006], карбонатитовых [Андреева, 2000; Panina, 2005], пегматитовых [Рейф, Ишков, 2003] и других. При миграции таких гетерофазных флюидов за пределы магматического очага наблюдаются разные сценарии эволюции их фазового состояния, что определяется изменением *PT*-параметров. Как правило, магматогенные флюиды остаются гетерофазными и за пределами магматического очага, и лишь в области влияния холодных метеорных вод происходит резкое снижение их концентрации за счет разбавления слабосолеными экзогенными водами. В некоторых случаях наблюдается частичная гомогенизация изначально гетерофазных магматогенных флюидов за счет конденсации  $H_2O$  парогазовой фазы при понижении температуры и разбавления образующимся конденсатом водно-солевой фазы. Такое „саморазбавление“ магматогенных флюидов достаточно определенно прослеживается по вертикали и латерали на Депутатском оловорудном месторождении, а судя по литературным данным, отмечается и на ряде других крупных оловорудных месторождений Корнуолла, Рудных Гор, Боливии и других регионов [Jackson et al., 1977; Durisova et al., 1979; Sugaki et al., 1988].



**Рис. 1. Высококонтрированные водно-солевые и газовые флюидные включения в кварце:**

*a* — рудных жил Депутатского месторождения, *б* — из кварц-турмалиновых пегматитовых жил бушвельдского комплекса, *в* — порфиоров месторождения Черпунья, *г* — эксплозивной брекчии, *д* — рудных жил месторождения Кальмакыр, *е* — порфиоров месторождения Одинокое.

Снижение концентрации флюидов к верхним и внешним частям рудообразующих систем, по мнению ряда исследователей, могло быть вызвано и смешением их с метеорными водами. Однако проведенные нами исследования изотопного состава кислорода карбонатов (сидерит, Mn-сидерит) из рудных жил внутренней (уч. Центральный), промежуточной (уч. Абрек) и внешней (уч. Булат, Инари-Буревестник) зон Депутатского рудного узла показали, что резкого изотопного облегчения  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  рудообразующих растворов от центральной его части (7,5—8,2 ‰) к промежуточной (6,7—7,8 ‰) и внешней (4,8—7,0 ‰) не устанавливается. Наблюдаемое некоторое снижение  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  отвечает, скорее всего, температурным эффектам фракционирования, а не изменению изотопных характеристик, которое могло быть связано с 2-, 3-кратным разбавлением магматогенных флюидов метеорными водами (снижение концентрации от 60 до 20 мас. %). В отличие от плутоногенных Sn-W рудно-магматических систем, для близповерхностных вулканогенно-гидротермальных Sn-Ag систем резкое разбавление магматогенных флюидов и низкие значения  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  рудообразующих растворов (−6,5...−1,5 ‰, м-ние Дукат) действительно могли быть обеспечены лишь за счет участия в рудообразовании низкоконцентрированных „изотопно-облегченных“ метеорных вод.



**Рис. 2. *PX*-диаграмма для системы NaCl—H<sub>2</sub>O [Sourirayan, Kennedy, 1962].**

На изотерме 700 °С схематично отображен фазовый состав флюидных включений, отвечающих гетерофазным флюидам при разных *PT*-параметрах.

Еще один сценарий эволюции фазового состава магматогенных флюидов описан [Williams-Jones, Heinrich, 2005] на примере Cu-Мо-порфирового месторождения Бингхем. По их данным, отделявшиеся от расплава флюиды находились в субкритическом состоянии и содержали невысокие концентрации солевых компонентов ( $10 \pm 5$  мас.%). По мере продвижения их к поверхности и снижения давления они становились гетерофазными за счет конденсации высокоплотной водно-солевой фазы и обособления низкоконцентрированной парогазовой фазы.

Для еще более глубоких нижнекоровых и мантийных уровней генерации магматогенных флюидов характерны преимущественно газовые флюиды, состоящие в основном из  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и других углеводородов в тех или иных сочетаниях [Летников и др., 1977; Соболев и др., 1978; Бердников, Приходько, 1981; Реддер, 1987; Летников, 2003, 2006; Томиленко, 2006; Шарапов и др., 2006]. Лишь на поздних этапах становления глубинных магматических очагов в связи с кристаллизацией поздних, обогащенных летучими компонентами остаточных расплавов обособляются водно-солевые флюиды.

### ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И МЕТАЛЛОНОСНОСТИ МАГМАТОГЕННЫХ ФЛЮИДОВ

Изучение состава флюидных и расплавных включений современными инструментальными методами (LA-ICP-MS, рентгеноспектральный микрозонд, ионный микрозонд, КР-спектроскопия и др.), а также результаты исследования вулканических газов позволили получить новые данные о геохимических особенностях и металлоносности магматогенных флюидов, характеризующихся разными уровнями генерации и различающихся по фазовому состоянию [Наумов, Шапенко, 1980, 1984; Roedder, 1984; Наумов и др., 1988; Heinrich et al., 1992; Рейф и др., 1992; Borisenko et al., 1997, 1999, 2001, 2003; Ulrich et al., 1999, 2001, 2002; Audétat et al., 2000a,b; Андреева, 2000; Рейф, Шишков, 2003; Смирнов и др., 2003; Reif et al., 2004; Zhitova et al., 2004, 2006; Прокофьев и др., 2005; Hanley et al., 2005a,b; Панина, 2005].

Однако обзор и анализ имеющихся литературных данных показали, что применяемая многими исследователями методика пересчета данных инструментального анализа (LA-ICP-MS, ионный и протонный микрозонд и др.) на реальную концентрацию рудных и петрогенных элементов в растворах включений через определение концентрации Na по NaCl-эквиваленту (криометрические данные) является неточной. Ошибка такого расчета составляет 200—500 % и обусловлена тем, что содержание Na (NaCl) в растворе включений определяется по данным криометрии применительно к двухкомпонентной системе  $\text{H}_2\text{O}$ —NaCl, хотя реальные растворы имеют более сложный состав и содержат высокие концентрации других компонентов — K, Fe, Ca и др. Поэтому реальные концентрации Na в таких водно-солевых системах могут в 2—5 раз отличаться от его содержаний, рассчитанных на основе использования простой системы  $\text{H}_2\text{O}$ —NaCl (рис. 3). Предложенный нами метод пересчета данных инструментального анализа растворов включений на истинные концентрации предусматривает проведение следующих операций [Борисенко и др., 1994; Borisenko et al., 2004]:

1) проведение криометрических исследований растворов включений с определением температур фазовых переходов: плавление эвтектик, льда, растворение твердых фаз и т. д.;

2) анализ флюидных включений с помощью LA-ICP-MS и другим инструментальным методом с определением преобладающих компонентов (обычно Na, K, Fe, Ca) и соотношения натрия с другими петрогенными и рудными элементами;

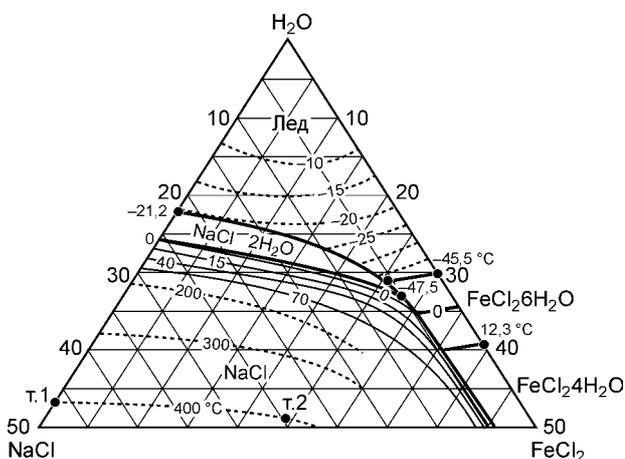
3) расчет реальных концентраций натрия на основе диаграмм состояния для 3-компонентных водно-солевых систем ( $\text{H}_2\text{O}$ —NaCl— $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ —NaCl—KCl,  $\text{H}_2\text{O}$ —NaCl— $\text{FeCl}_2$  и т. д.), данных криометрии и определенных инструментальным методом реальных соотношений натрия с другими преобладающими компонентами раствора (Na:K, Na:Ca, Na:Fe и т. д.);

4) определение концентраций рудных и петрогенных элементов в растворах включений через концентрацию Na, определенную методом криометрии, и соотношения Na с другими элементами, установленными инструментальными методами.

Такой подход позволяет существенно (на 1—2 порядка) повысить точность определения концентраций рудных и петрогенных элементов в рас-

**Рис. 3. Диаграмма состояния водно-солевой системы  $\text{H}_2\text{O}$ —NaCl— $\text{FeCl}_2$ .**

Разброс значений концентраций NaCl в растворе, определенный при температуре растворения NaCl в 2-компонентной водно-солевой системе  $\text{H}_2\text{O}$ —NaCl (т. 1) и 3-компонентной  $\text{H}_2\text{O}$ —NaCl— $\text{FeCl}_2$  (т. 2). Концентрация NaCl в т. 1 — 47 мас.%, в т. 2 — 25 мас.%.



творях флюидных включений, поставить их на количественный уровень. Это особенно важно учитывать при определении состава концентрированных растворов многофазных включений, содержащих солевые фазы.

Изучение магматогенных флюидов гигабассального уровня генерации на основе применения современных инструментальных методов термобарогеохимии позволило детально охарактеризовать особенности их состава и металлоносности и выделить два принципиально различных типа гетерофазных флюидов, существенно отличающихся по значениям окислительно-восстановительного потенциала.

Первый тип **гетерофазных восстановленных магматогенных флюидов** охарактеризован на примере Sn-W-Ag [Борисенко и др., 1997; Heinrich et al., 1999; Audétat et al., 2000a,b], Au-скарновых (Au-Cu-As), Au-As геохимических типов и некоторых Cu-Ni-Pt (м-ния Седбери, Чинейское) [Zhitova et al., 2004; Hanley et al., 2005b] и карбонатитовых (м-ние Карасуг, Улатай-Чоз) рудно-магматических систем. Для них также характерны гетерофазное состояние (концентрированный раствор или расплав-рассол и парогазовая фаза) и низкие значения окислительно-восстановительного потенциала. Они характеризуются:

— высокими концентрациями солевых компонентов в водно-солевой составляющей (40—95 мас.%) и преимущественно CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> или CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> составом газов;

— среди солевых компонентов резко преобладают хлориды Na, Fe, K, Mn, Ba и иногда карбонаты;

— судя по присутствию во включениях двухвалентного железа (кристаллогидраты FeCl<sub>2</sub>) и CH<sub>4</sub>, водно-солевая фаза гетерофазных флюидов этого типа отличалась достаточно низкими значениями редокс-потенциала;

— парогазовая составляющая содержала невысокие концентрации солевых компонентов (<7—10 мас.%), среди которых установлены NaCl, KCl, CsCl, а в составе газов преобладала CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> >> N<sub>2</sub> > CH<sub>4</sub>);

— значения редокс-потенциала парогазовой составляющей были заметно выше (CO<sub>2</sub> > CH<sub>4</sub>), чем у водно-солевой фазы (CH<sub>4</sub> > CO<sub>2</sub>).

В качестве примера описания таких флюидов можно привести данные по некоторым изученным нами оловорудным месторождениям Якутии и Памира [Борисенко и др., 1996, 1997; Höll et al., 2000; Vladimirov et al., 2000]. Собственно магматогенные флюиды изучены по флюидным включениям, сингенетичным расплавному включениям в кварце гранит-порфиров Депутатского месторождения и топазсодержащих аляскинтов месторождения Одинокое.

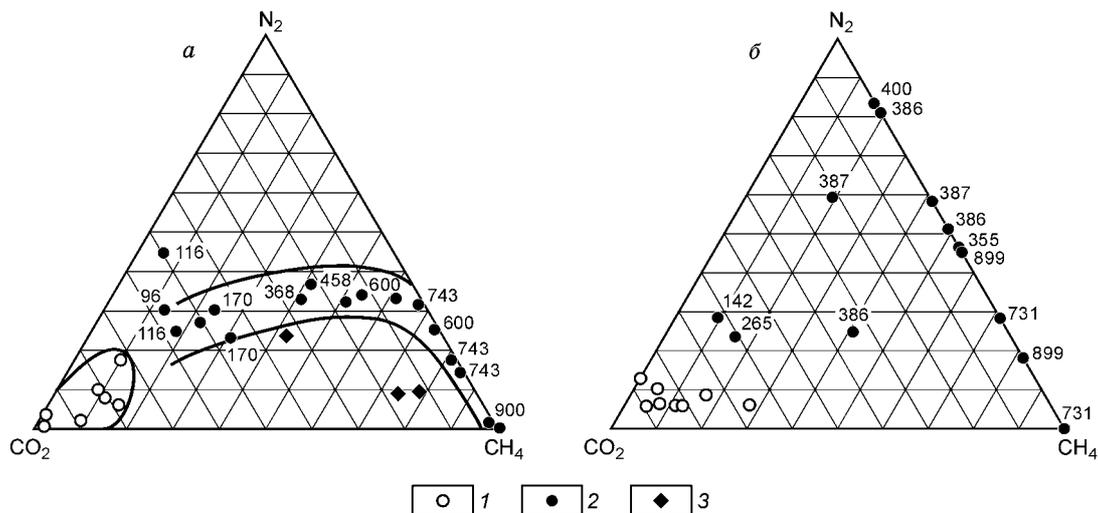
Их сингенетичность доказывается наличием комбинированных расплавленных включений, содержащих в переменных количествах в разной степени раскристаллизованную силикатную фазу, водно-солевую и существенно парогазовую фазы. Флюиды, отделявшиеся от расплава, являлись гетерофазными. Фаза расплава-рассола отличалась высокими концентрациями солевых компонентов до 50—60 мас.% и более, в составе которых преобладали хлориды Na, Fe, K, Mn, Ba (табл. 1). Их соотношение отвечало следующему ряду Na ≥ Fe > K > Mn > Ca > Ba. Среди рудных элементов (мас.%) установлены Sn (до 0,15), W (до 0,01—0,1), Zn (до 1,23), As (до 0,7), Cu (до 0,84), Pb (до 0,2), а также Ag, Sb, Bi и др. Содержание серы в растворе достигало 0,65 мас.%. Газовая составляющая представлена CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub> и небольшим количеством CO<sub>2</sub> (рис. 4). Газовые включения состояли из небольшого количества раствора с концентрацией 1—5 мас.% и газа, в составе которого преобладала CO<sub>2</sub>, в меньших количествах отмечались N<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>. Основными солевыми компонентами таких флюидов являлись хлориды Na ≥ Fe > K > Ca > Mn. Из руд-

Таблица 1. Результаты анализа LA-ICP-MS газовых и многофазных включений в кварце гранит-порфиров оловорудного месторождения Черпунья (мас.%)

Элемент	Многофазное* включение	Газовое (г > ж)
Na	13,7	1,8
K	11	6,0
Cu	0,05	<b>0,16</b>
As	0,03	0,008
Mo	0,0062	0,0005
Ag	0,0008	<b>0,004</b>
Sn	0,16	<b>0,21</b>
Sb	0,0015	<b>0,012</b>
Pb	0,7	—
W	0,06	—
Bi	0,02	—

Примечание. Полужирным выделены элементы, накапливающиеся преимущественно в газовой фазе.

\* На качественном уровне в растворе включения установлено присутствие Hg.



**Рис. 4. Состав газовой фазы флюидных включений в кварце касситерит-арсенопирит-кварцевой стадии (а) и сульфидной стадии (б) из разных горизонтов Депутатского оловорудного месторождения.**

Цифрами обозначена глубина отбора проб (м). Включения: 1 — газоподобные, 2 — многофазные, 3 — водно-солевые в кварце гранит-порфиоров и топазовых аляскитов.

ных элементов в значимых количествах установлены Cu, Zn, Ag, а также легколетучие компоненты В, As, Sb, Bi и качественно Hg.

Близкие по составу, по концентрации, металлоносности и фазовому состоянию флюиды установлены и во включениях в кварце рудных жил Депутатского месторождения. Преобладающими солевыми компонентами водно-солевой фазы таких флюидов являются хлориды Na, K, Fe, Mg и Ba, причем на глубоких горизонтах их соотношение отвечает ряду  $Na \geq Fe > K > Mg > Ca > Ba$ , на верхних —  $Na = K = Fe > Ba = Mg > Ca$ . Таким образом, установлено снижение содержания (мас.%) от глубоких горизонтов к поверхности Na (12,6—16,5 → 4,7—6,9), Cs (0,2 → 0,03) и Sn (0,24 → 0,07) и повышение Fe (3,9 → 6,7), K (2,2 → 6,3), Ca (0,11 → 0,86), Ba (0,2 → 2,65). Уровни концентраций (мас.%) основных рудных элементов в них составляют: Sn — до 0,24, W — до 0,36, Mo — до 0,04, Zn — до 0,2—1, Ag — до 0,092, Pb — до 0,54, Cu — 0,01—0,1, As — 0,001—0,057, присутствуют также Sb, Bi, Cs, Ba и другие.

Характерно, что от глубоких горизонтов к поверхности устанавливается направленное изменение состава газовой фазы кристаллофлюидных и газовых включений (см. рис. 4). На глубоких горизонтах в кристаллофлюидных включениях она представлена CH<sub>4</sub> или CH<sub>4</sub> + N<sub>2</sub>, а в газовых — CO<sub>2</sub> >> N<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>. Выше она меняется на N<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> > CO<sub>2</sub> (в кристаллофлюидных) и CO<sub>2</sub> > N<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> (в газовых). На верхних уровнях состав газовой фазы этих двух типов включений сближается. Сопоставление состава растворов ранней касситерит-арсенопирит-кварцевой стадии и более поздней сульфидной на Депутатском месторождении позволило установить более высокие содержания Ca, Mg, Ba, Ni, Fe, Zn, As, Cu и низкие Cs, Rb, W, Mo в растворах поздней стадии.

На примере Базардаринского гранитоидного массива (ЮВ Памир), с которым связано разнотипное оловянное и серебряное оруденение, прослежена эволюция состава магматогенных флюидов, отделившихся на разных этапах становления этой многофазной интрузии. В кварце последовательно внедрившихся фаз (граниты главной фазы → аплиты и пегматиты → топаз-протолитионитовые граниты → онгониты), установлены расплавные и сопутствующие им флюидные включения. Детальное изучение методом КР-спектроскопии состава газовой фазы расплавных включений показало, что во всех типах пород в ней резко преобладает азот с небольшой примесью CH<sub>4</sub> (до 10,5 мол.%) (табл. 2). В сопутствующих им флюидных включениях от ранних фаз к поздним устанавливается направленное изменение соотношения газовых компонентов: ранние фазы — CO<sub>2</sub> или CO<sub>2</sub> >> CH<sub>4</sub> ± N<sub>2</sub>; аплиты, пегматиты — CO<sub>2</sub> >> N<sub>2</sub> > CH<sub>4</sub>; топаз-протолитионитовые граниты — CO<sub>2</sub> > CH<sub>4</sub>; онгониты — N<sub>2</sub> ≥ CH<sub>4</sub> >> CO<sub>2</sub>. Сопутствующие расплавным кристаллофлюидным включениям установлены лишь в онгонитах, в составе газовой фазы в них присутствуют в переменных количествах CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub> (см. табл. 2). Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о существенном нарастании восстановленности флюидов, отделившихся от последовательно внедрившихся порций гранитных расплавов при становлении Базардарин-

Таблица 2. Результаты изучения состава газовой фазы расплавных и флюидных включений в минералах магматических пород Базардаринского оловоносного массива (моль. %)

Порода	Минерал	Расплавные включения			Флюидные включения		
		CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Онгонит	Кварц	0,0	89,5	10,5	0,0	56,8	43,2
»	»	0,0	94,9	5,1	1,0	72,8	26,2
»	»	0,0	100	0,0	1,7	77,1	21,2
»	»	—	—	—	7,7	74,8	17,5
Топаз-протолитионитовый гранит	Кварц	—	—	—	100,0	0,0	0,0
	»	—	—	—	99,3	0,0	0,7
	»	—	—	—	78,8	0,0	21,2
Пегматит	Кварц	0,0	100,0	0,0	93,9	0,0	6,1
	Берилл	—	—	—	58,6	21,4	19,0
Гранит (главная фаза)	Кварц	—	97,4	2,6	100,0	0,0	0,0
	»	—	—	—	95,5	0,0	4,5
	»	—	92,3	7,7	71,1	19,3	9,6

Примечание. Прочерк — расплавные включения не установлены.

ского оловоносного гранитоидного массива. При этом на ранних этапах дегазация гранитоидного расплава сопровождалась отделением существенно-газовых (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>) флюидов, и лишь с поздними онгонитовыми расплавами связано появление гетерогенных флюидов, представленных концентрированными расплавами-рассолами и газовой фазой, обогащенной азотом и метаном. В кристаллофлюидных включениях из онгонитов установлены высокие содержания Fe, Mn, Zn, As и Sn.

Восстановленные магматогенные флюиды характерны и для некоторых щелочно-ультрабазитовых и щелочных комплексов с карбонатитами. Они установлены во флюидных включениях в минералах карбонатитов F-P3Э-Fe месторождений Тувы (Карасуг, Улатай-Чоз) и Памира (Дункельдык), связанных со щелочными комплексами. Во флюорите и кварце из карбонатитов присутствуют два типа флюидных включений: кристаллофлюидные (р-р + газ + NaCl + 1-3 тв. фазы) (рис. 5) и существенно газовые (CO<sub>2</sub> >> CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>). Гомогенизация кристаллофлюидных включений достигается при температурах >500—550 °С, их концентрация составляет >60 мас.%. Газовые включения представлены в основном CO<sub>2</sub> (>80 моль.%), а также N<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>. Анализ кристаллофлюидных включений на LA-ICP-MS показал, что в их составе преобладают хлориды Na, Ca, K и Fe (см. табл. 1), причем содержание K и Fe (около 12 мас.%) существенно выше, чем Na и Ca. Спецификой состава таких флюидов являются высокие концентрации (г/т) Се (до 1100), Mn (до 11000), Zn (2000), Pb (760) и других рудных элементов.

„Окисленные“ гетерофазные флюиды характерны для Cu-Мо-порфировых PMC, связанных с разными по составу магматическими комплексами [Наумов и др., 1995; Heinrich et al., 1999; Ulrich et al., 1999; Rusk et al., 2004; William-Jones, Heinrich, 2005], а также для некоторых типов Cu-Ni-Pt PMC

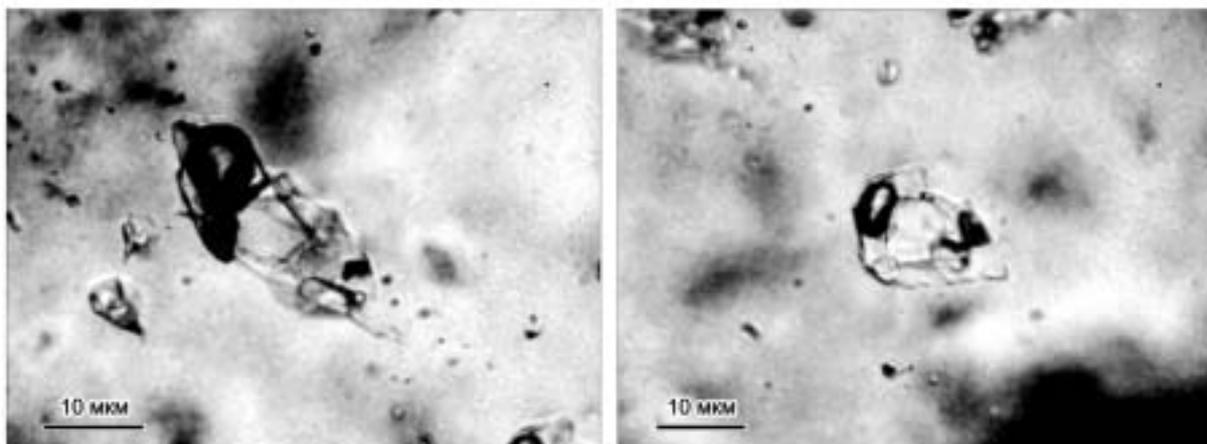


Рис. 5. Многофазные флюидные включения в кварце гранит-порфиров Cu-Мо-порфирового месторождения Кальмакыр.

(Бушвельд, Стиллуотер) [Ballhaus, Stumpfl, 1986; Zhitova et al., 2004; Hanley et al., 2005a; Житова и др., 2006], Au-скарновых (Au-Cu-Te тип), пегматитовых (Ермаковское Ве-месторождение) и карбонатитовых (Мушугай-Худук, Крестовое и др.) месторождений [Андреева, 2000; Panina, 2005]. Особенностью состава таких флюидов является:

— гетерофазное состояние: высококонцентрированный раствор или расплав-рассол и парогазовая фаза;

— водно-солевая фаза имеет хлоридно-сульфатный состав и высокие концентрации солевых компонентов (40—70 мас. %);

— среди солевых компонентов в водно-солевой фазе преобладают хлориды Na, K, Fe, Mn, Ca, сульфаты Ca и Na, сульфиды, состав газов представлен  $\text{CO}_2 > \text{N}_2 > \text{H}_2\text{S}$ ;

— окислительно-восстановительный потенциал таких растворов или расплав-рассолов отвечает значениям сульфид-сульфатного равновесия, о чем свидетельствует присутствие во включениях сульфидов (халькопирит,  $\text{H}_2\text{S}$ ) и сульфатов (ангидрит, гипс), гематита, хлоридов двух- и трехвалентного железа и т. д.;

— в газовой составляющей гетерофазных флюидов концентрация солевых компонентов не превышает 5—7 мас. %, а в составе газов преобладает  $\text{CO}_2 > \text{N}_2 \gg \text{H}_2\text{S}$ , редко отмечается метан;

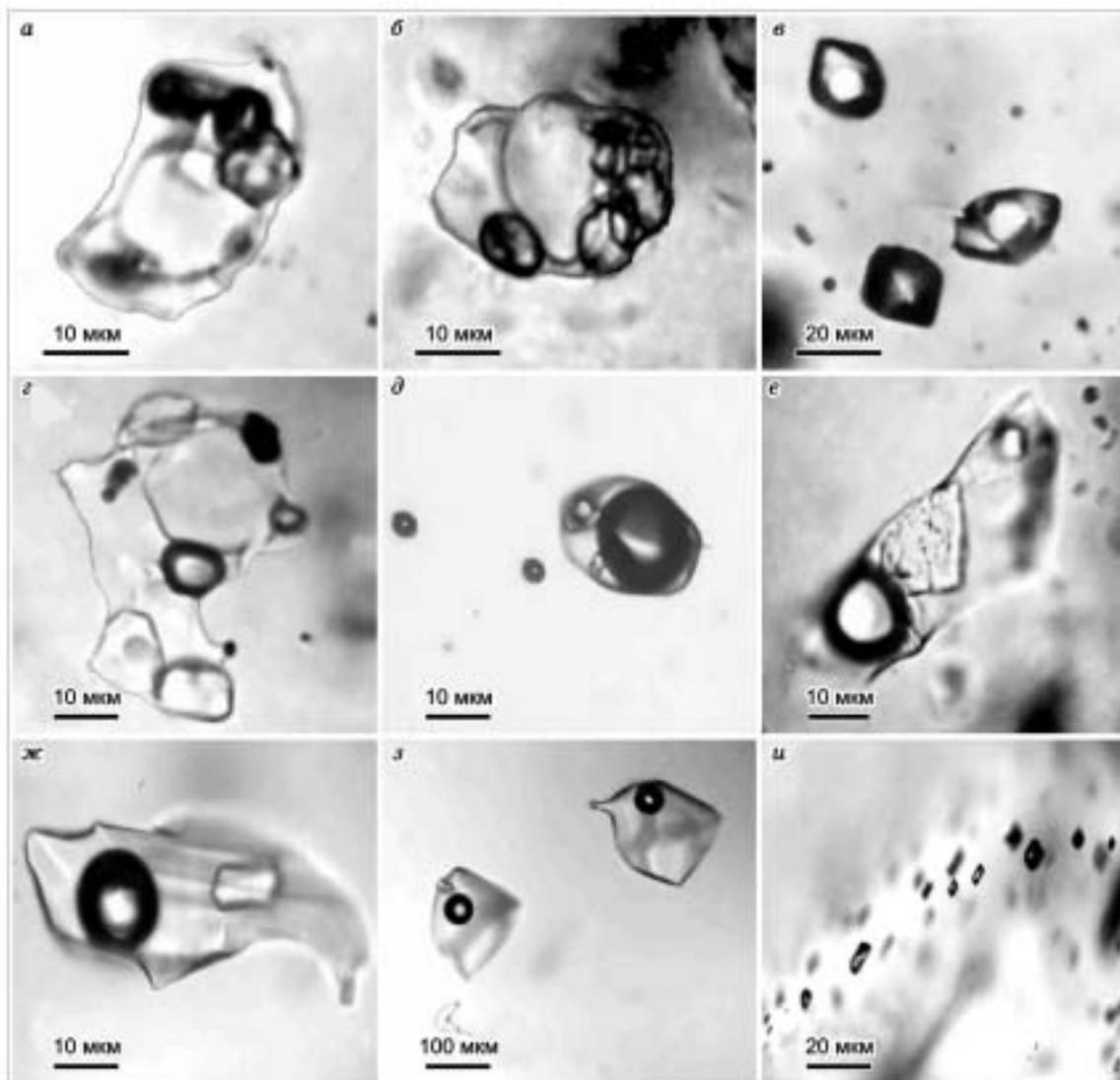
— газовая составляющая представлена более восстановленными флюидами (присутствие  $\text{H}_2\text{S}$ ) относительно водно-солевой составляющей, значения Eh которой отвечают сульфат-сульфидному равновесию.

Такого типа флюиды нами изучены на Cu-Мо-порфиновых (Кальмакыр, Сорское, Жирекен, Боргулюкан, Рябиновое, Баян-Обо и др.) и Cu-Ni-Pt (Бушвельд) месторождениях. Магматогенные флюиды Cu-Мо-порфиновых месторождений являлись гетерогенными (водно-солевая и парогазовая фазы) (см. рис. 1, 5), что устанавливается не только на уровне рудоотложения, но и при их отделении от магматического расплава (флюидные включения в кварце рудоносных гранит-порфиров). Однако, в отличие от Sn-Ag рудно-магматических систем, рудообразующие флюиды Cu-Мо (Au)-порфиновых месторождений существенно отличаются по значениям окислительно-восстановительного потенциала, отвечающего сульфат-сульфидному равновесию. Об этом свидетельствует присутствие сульфатов (ангидрит) и сульфидов (халькопирит), а также гематита в качестве твердых фаз в кристаллофлюидных включениях, что установлено при изучении включений на сканирующем электронном микроскопе. Изучением кристаллофлюидных и газовых включений в кварце гранит-порфиров Cu-Мо (Au)-порфиновых месторождений на LA-ICP-MS установлено, что в них законсервированы высококонцентрированные (50—70 мас. %) хлоридные растворы или расплавы-рассолы, преобладающими компонентами которых являются  $\text{Na} > \text{K} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn}$ . В переменных количествах присутствует Ca (до 3—5 мас. %). Причем его содержание коррелирует с содержанием серы во включениях (0,1—2,8 мас. %), что, вероятно, связано с присутствием в них ангидрита, диагностированного на электронном микроскопе. В составе твердых фаз на сканирующем электронном микроскопе установлены галит (преобладает), сильвин, ангидрит, хлориды Fe и Mn, гематит и карбонаты (рис. 6).

Среди рудных элементов преобладают Zn (до 1 %), Cu (0,22—0,4 %), Mo (0,09 %), Pb (0,05 %), Rb (0,2 %), As (0,002 %), а также Ag, Sb, Sr (см. табл. 1). Газовая фаза таких кристаллофлюидных включений представлена в основном  $\text{CO}_2 \geq \text{N}_2$  (табл. 3), газовые включения — раствором (обычно менее 10 %) и газом. В растворе с концентрацией 2—7 % установлены хлориды Na, K, Fe и Mn. Среди рудных элементов в значимых количествах установлены As, Sb, Zn, Cu, Bi, Ag.

Аналогичные результаты были получены при изучении флюидных включений в минералах Cu-Мо-порфинового месторождения Боргулюкан и Au(Cu)-порфиновых месторождений Кировское (Забайкалье) и Рябиновое (Алдан). В высококонцентрированных хлоридных флюидах Cu-Мо-порфиновых месторождений установлены высокие концентрации профилирующих металлов (Cu, Mo, Fe и др.). Рудообразующие флюиды Cu-Мо-порфиновых месторождений, по данным изучения флюидных включений методом LA-ICP-MS, содержат (мас. %): Fe до 19 (хлориды и гематит), Cu — 0,9—0,1 (хлориды и халькопирит), Mo — 0,4—0,01 (растворимые формы и молибденит), а также S — 3,6—4, As — 0,07—0,03, Sb до 0,2, Ag — 0,04—0,002, Au до 0,0002. Рудообразующие флюиды Au(Cu)-порфиновых месторождений содержали Fe до 11 (хлориды), Cu до 1,5, Mo — 0,003—0,002, As — 0,006—0,001, Sb до 0,002, Ag — 0,002. Газовая фаза гетерофазных флюидов Cu-Мо- и Au(Cu)-порфиновых месторождений на уровне рудоотложения в целом содержала меньшие концентрации металлов, чем конденсированная водно-солевая, но была специализирована на ряд летучих элементов: As, Hg, Sb, Bi и др.

Новые интересные данные об окисленных магматогенных флюидах были получены при изучении флюидных включений в кварце из разновозрастных парагенезисов Рустенбургской расслоенной серии бушвельдского комплекса (ЮАР) [Боровиков и др., 2005; Zhitova et al., 2006; Житова и др., 2006]. Кварцы были отобраны из рифа Меренского, трубок ультрабазитовых пегматитов PLUMP [Kinnaird et al., 2004] и пегматитовых жил с турмалином (см. рис. 6).



**Рис. 6. Морфологические типы флюидных включений из кварцев Рустенбургской расслоенной серии бушвельдского комплекса.**

Риф Меренского: многофазные включения: *a* — первичное из миаролового кварца ( $L + V + H + 1-4S$ ); *b* — вторичное ( $L + V + H + 1-4S$ ) из симплектитового кварца. Кварцы из турмалиновых пегматитов: *v* — газовое включение с жидкой углекислотой ( $(L + L_{CO_2} + V)$ ); *z* — многофазное включение ( $L + V + H + 6S$ ). Кварцы из калициатовых пегматитов: *d*, *ж* — многофазные включения ( $L + V + H + S$ ). Миароловый кварц из краевой зоны железистой ультрабазитовой трубки PLUMP: *e*, *z* — трехфазное включение: *e* — ( $L + V + H$ ), *z* — ( $L + V + S$ ); *u* — метановые газовые включения ( $V \gg L$ ). Фаза: L — жидкая, V — газовая, H — изотропная солевая (галит), S — анизотропная твердая.

Полученные при изучении флюидных включений данные позволили существенно дополнить имеющуюся к настоящему времени информацию [Ballhaus, Stumpfl, 1986] о составе и металлоносности магматогенных флюидов, отделявшихся от расплавов на разных этапах становления Рустенбургской расслоенной серии. Возникновение таких флюидов связано с раскристаллизацией интеркумулусного флюидонасыщенного алюмосиликатного расплава. Отделение флюидов от расплава происходило в такой последовательности: флюидонасыщенный алюмосиликатный расплав → алюмосиликатный расплав + гетерофазный магматогенный флюид (предельно концентрированный солевой расплав-рассол + газ) → гетерофазный магматогенный флюид (солевой расплав-рассол + газ) → гетерофазный постмагматический флюид (водно-солевой раствор + газ). Такая последовательность смены фазового состава флюидов наиболее ясно прослеживается по расплавленным и флюидным включениям в кварцах пироксенит-пегматитов рифа Меренского и кварц-турмалиновых пегматитовых жил.

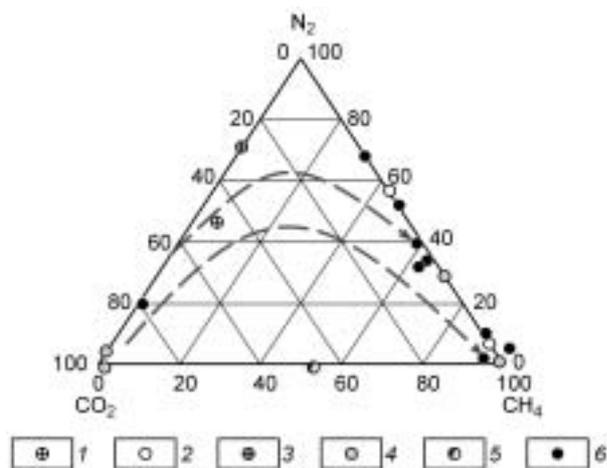
Таблица 3. Результаты изучения газовой фазы флюидных включений (методом КР-спектроскопии) в минералах руд Cu-Мо-порфировых, Sn-W месторождений (мол.%)

Месторождение	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Кальмакыр, Cu-Мо-порфировое	0	100	0
	39,6	60,4	0
	40,8	59,2	0
	61,3	38,7	0
	64,5	35,5	0
	71,3	28,7	0
	79,4	20,6	0
	100	0	0
	100	0	0
Жирекен, Cu-Мо-порфировое	60,4	39,6	0
	97,3	2,7	0
Сорское, Cu-Мо-порфировое	99,5	0	0
Ачитнурское (Sn-W)	75,9	3,0	21,10
Светлое (Sn)	79,4	0	10,6
Фестивальное (Sn)	87,9	—	12,1
Перевальное (Sn)	46,2	25,6	28,2
Акджилга (Sn)	65,2	22,8	12,0
	93,4	6,2	0,4
Трезубец (Sn-W)	24,9	69,6	5,5
	79,5	0	20,5
Учимчек As (Sn)	0	78,8	21,2
	2,0	39,5	58,8
	0	38,00	62,0
Юстыдское (Sn-W)	0	0	100

Примечание. В составе газовой фазы содержится 0,5 моль.% H<sub>2</sub>S.

В ранних симплектитовых кварцах рифа Меренского и пегматитовых жил обнаружены расплавные включения и сопутствующие им мелкие флюидные многофазные и газовые включения. Это свидетельствует о том, что в период кристаллизации такого кварца магматогенные флюиды присутствовали в расплаве в гетерофазном состоянии и были представлены обособленными фазами солевого расплава-рассола и пузырьков газа (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и др.). В миароловом кварце из рифа Меренского и ядерных зон кварц-турмалиновых пегматитовых жил обнаружены только многофазные и газовые флюидные включения, состав и физико-химические параметры захвата которых более детально изучены (см. рис. 6). По этим данным температуры магматогенных флюидов, сформировавших миароловые кварцы этих ассоциаций, существенно превышали 450 °С (температура декрепитации включений), предположительно они достигли 600—650 °С, судя по соотношению твердых фаз, раствора и газовой фазы во включениях. Фаза солевого расплава-рассола с концентрацией более 60—70 мас.% NaCl-экв. содержала хлориды Na, Fe, Mn, Ca, K, сульфаты Ca, Ba и карбонаты Ca, что установлено изучением включений на сканирующем электронном микроскопе. По данным [Ballhaus, Stumpf, 1986], в многофазных включениях в кварце рифа Меренского определен нахколит (NaHCO<sub>3</sub>), что указывает на присутствие в таких расплавах-рассолах и карбонатов Na. В газовой составляющей гетерофазных магматогенных флюидов преобладала углекислота (CO<sub>2</sub> > N<sub>2</sub> > H<sub>2</sub>O). Наиболее поздними и низкотемпературными (<300 °С) являлись метансодержащие флюиды, с которыми связано образование внешних зон кристаллов миаролового кварца. Эти флюиды также находились в гетерофазном состоянии, представляя собой растворы с концентрацией 7—30 мас.% NaCl-экв. и обособленной газовой фазой, в составе которой преобладали метан и азот (рис. 7).

Таким образом, главной особенностью магматогенных флюидов Рустенбургской расслоенной серии является их гетерофазное состояние, существенно хлоридный состав и последовательное снижение концентрации от 60—70 мас.% и более до 30—7 мас.% при остывании. Примечательно, что такая же направленность эволюции состава и фазового состояния магматогенных флюидов характерна для многих



**Рис. 7. Состав газовой фазы включений по данным КР-спектроскопии.**

Риф Меренского: 1 — многофазные включения, 2 — поздние газовые включения. Кварц-турмалиновые пегматиты: 3 — многофазные включения, 4 — газовые включения; 5 — кварц-полевошпатовые пегматиты; 6 — двухфазные и газовые включения из краевых зон ультрабазитовых трубок (PLUMP).

Cu-Мо-порфировых, Sn-W и других рудно-магматических систем [Roedder, 1984; Bodnar, 1995; Borisenko et al., 1997; Vladimirov et al., 2000].

Специфической чертой химического состава магматогенных флюидов Рустенбургской расслоенной серии является их многокомпонентность, преобладание хлоридов Na, K, Ca, Fe, Mn, присутствие

карбонатов и сульфатов кальция, а также рудных компонентов. Во включениях кварца рифа Меренского установлены растворы и расплавы-рассолы с резким преобладанием хлоридов Na, Fe, Mn, Ca, причем  $Na \gg K$ . Присутствие во включениях твердых фаз ангидрита и сульфидов свидетельствует о том, что Eh таких растворов отвечает сульфид-сульфатному равновесию. В газовой фазе растворов и расплаво-рассолов преобладали  $CO_2$  и  $N_2$  при незначительных количествах метана (см. рис. 7). При исследовании многофазных включений рифа Меренского методом LA-ICP-MS, наряду с присутствием высоких содержаний Na, Fe, S, K (мас.%), установлены значимые концентрации металлов (г/т): Sn (1000), Mo (300), As (500), Sb (40), Bi (10), а также Ni, Cr. Растворы и расплавы-рассолы аналогичных многофазных включений в кварце из турмалиновых пегматитовых жил содержат тот же комплекс элементов, что и магматогенные флюиды рифа Меренского. Существенные различия состава флюидов этих ассоциаций выражаются в присутствии более высоких концентраций K, а также в более высокой металлоносности флюидов кварц-турмалиновых жил. По данным LA-ICP-MS, во включениях из кварцев этих жил установлены (г/т): Ni — 20, Cu — 400, Zn — 600, As — 500, Sb — 100, Pb — 5000, Bi — 70, Sn — 50, а также Ag — 2 (табл. 4). В этих же включениях методом сканирующей электронной микроскопии выявлены W, Mo (молибдошеелит), Pb (хлорид Pb), Ba (барит). В газовой фазе таких включений  $N_2$  преобладает над  $CO_2$ , метан отсутствует. В сингенетичных с многофазными газовых включениях наблюдается резкое преобладание  $CO_2$  над  $N_2$  при отсутствии метана. Такой характер распределения газовых компонентов между расплаво-рассолом ( $N_2 > CO_2$ ) и газовой фазой ( $N_2 \ll CO_2$ ) в гетерофазных флюидах также характерен для Sn-W и Cu-Мо-порфировых рудно-магматических систем [Borisenko et al., 1997].

Поздние низкотемпературные (<300 °C) постмагматические флюиды существенно отличаются от вышеописанных по концентрации (7—30 %), содержанию рудных компонентов и составу газовой фазы, в которой преобладал метан (см. рис. 7). Наиболее типичные включения, отражающие состав и металлоносность этих флюидов, проанализированы в кварце из миароловых пустот в краевых зонах трубкообразных железистых ультрабазитовых пегматоидов IRUP. По данным LA-ICP-MS, в составе включений установлены компоненты (мас.%): Na (5—11), K (до 3), Fe (до 5), а также значимые концентрации следующих металлов (г/т): Ni — 500—2000, Zn — 1000, Cu — 300, As — 60—700, Mo — 100—200, Sn — 50—500, Sb — 90—600, 400, Pb — 4, Bi — 0,4—100. Высокие содержания Ni, Zn, Mo, Sb в этих включениях свидетельствуют о возможности миграции этих элементов в составе восстановленных магматогенных флюидов.

Важно отметить, что магматогенные и постмагматические флюиды Рустенбургской расслоенной серии весьма сходны по составу с флюидами, установленными при изучении включений в кварце графических полевошпатовых пегматитов ниже J-M рифа расслоенного комплекса Стиллутотер [Hanley et al., 2005a].

Изучение газовой фазы флюидных включений методами криометрии и КР-спектроскопии (см. табл. 4, рис. 7) позволило установить общую направленность эволюции состава газовых компонентов магматогенных флюидов. Она выражается в смене ранних обогащенных  $CO_2$  (расплавы-рассолы, парогазовая фаза) более поздними метан-азотными растворами. Такое изменение во времени состава газов свидетельствует о резкой смене окислительно-восстановительного потенциала магматогенных флюидов от окисленных углекислотных до восстановленных метановых. В составе газовой фазы флюидных включений в кварце из турмалиновых жил и кварц-плагиоклазовых графических сростаний из краевых зон PLUMP установлен гелий. Изотопные соотношения  $^3He/^4He$  составляют  $0,17 \cdot 10^{-6}$  и  $0,23 \cdot 10^{-6}$ , что отвечает значениям гелия корового происхождения.

Таблица 4. Содержания металлов и петрогенных компонентов во флюидных включениях из кварцев Рустенбургской расслоенной серии бушвельдского комплекса (по данным LA-ICP-MS)

Компонент	Пироксенит-пегматиты рифа Меренского	Краевая зона ультрабазитовой трубки PLUMP	Кварц-ортоклазовые граф. сростания из пегмат. жилы, секущей габбронориты Критической Зоны расслоенной серии		Кварц-турмалиновые пегматитовые жилы
	Многофазные L + V + H + 1-4S	Двухфазные L + V	Двухфазные L + V	Многофазные L + V + H + 1-2S	Многофазные L + V + H + 1-8S
	Состав газовой фазы (мол.%)				
	CO <sub>2</sub> — 24,8 N <sub>2</sub> — 75,2	CO <sub>2</sub> — 80,6 CH <sub>4</sub> — 46,4	CH <sub>4</sub> — 68,2 N <sub>2</sub> — 30,8	CH <sub>4</sub> — 59,4 N <sub>2</sub> — 40,6	CO <sub>2</sub> — 24,8 N <sub>2</sub> — 75,2
Na, мас.%	18	8	5	11	23,6
S	28	0	0	0	0,4
K	11	1,8	0,05	3	12,5
Cr	23	6,3	0	0—11	0
Fe	13	0	4	0—5	6,2
Ni	7	0	0,2	0—0,5	0,002
Co, г/т	0	10	0	0	0
Cu	0	50	300	0	400
Zn	0	0	1000	0	600
As	50	0	60	600—700	500
Mo	900	0	0	100—200	0
Ag	0	9	0	0	2
Sn	1000	0	50	100—500	50
Sb	40	0	90	200—600	100
Au	0	5	0,1	0	0
Hg	0	0	70	0	2
Pb	0	0	4	0	5000
Bi	10	0	0,4	20—100	70

Таким образом, результаты проведенных исследований магматогенных флюидов Рустенбургской расслоенной серии Бушвельда заключаются в следующем.

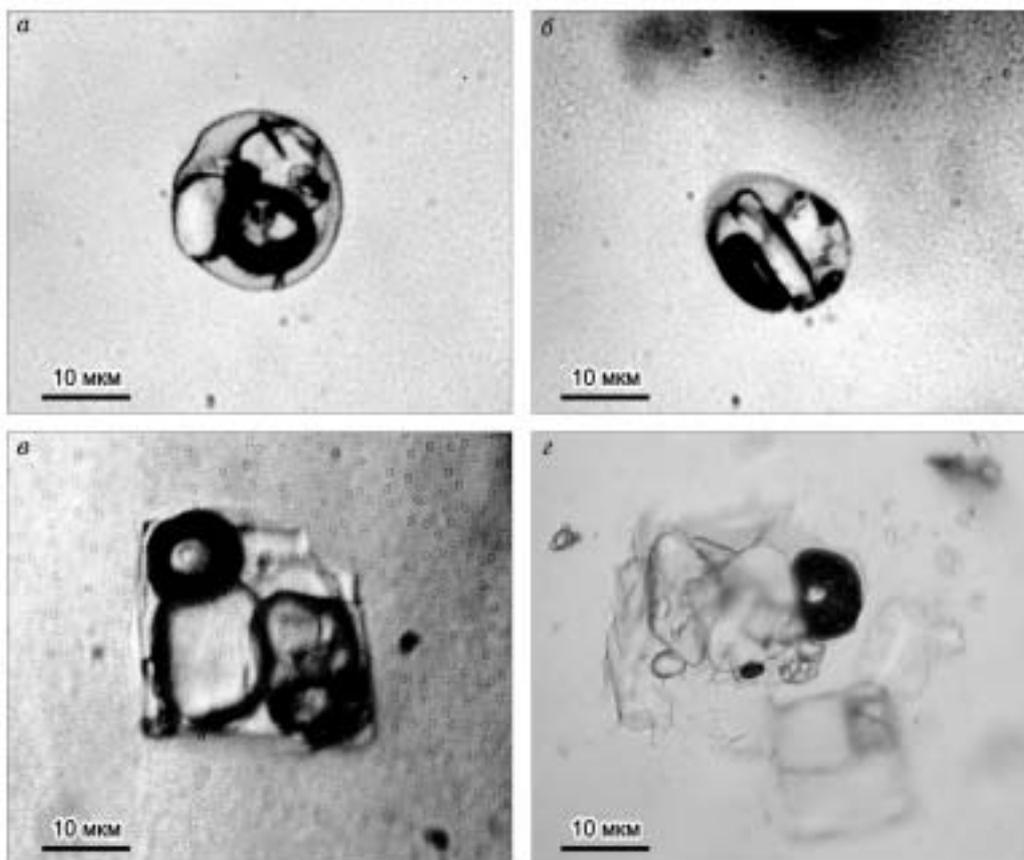
1. Установлено, что магматогенные флюиды, отделившиеся от алюмосиликатного расплава, являлись гетерофазными и представляли собой солевые расплавы-рассолы или растворы с обособленной газовой фазой.

2. Эволюция флюидов во времени выражается в последовательном снижении концентрации водно-солевой фазы от 60—70 до 30—7 мас.% и инверсии состава газовой фазы с азотно-углекислотной на азотно-метановую. Ранние флюиды являлись окисленными, о чем свидетельствует присутствие сульфатов в их водно-солевой составляющей и CO<sub>2</sub> в газовой фазе. Поздние флюиды обладали низким окислительно-восстановительным потенциалом, на что указывает преобладание метана в газовой фазе.

3. Главными солевыми компонентами магматогенных флюидов являлись хлориды Na, K, Fe, Ca, Mn, второстепенными — сульфаты и карбонаты Ca, Na. Металлоносность этих флюидов выражается в присутствии высоких концентраций Fe, Mn, Ni, Zn, Pb, Sn (мас.%), Cu, As, Sb, Mo, Bi (10—1000 г/т). Характерно, что содержание ряда рудных элементов (Ni, Sb, Bi) существенно выше в восстановленных метаносодержащих флюидах. Для окисленных высококонцентрированных расплаво-рассолов и растворов с углекислотной газовой фазой характерны повышенные концентрации Mo, W, Pb, Sn, Cr.

4. Присутствие в магматогенных флюидах значимых содержаний Cu, Ni, Cr — профилирующих рудных элементов бушвельдского комплекса свидетельствует о возможности их перераспределения магматогенными и постмагматическими флюидами в процессе становления Рустенбургской расслоенной серии.

Окисленные гетерофазные магматогенные флюиды, отделившиеся от щелочно-гранитного расплава, описаны на Ермаковском Fe-Be месторождении в Забайкалье [Рейф, Ишков, 2003; Reif et al., 2004]. Исследования расплавных и флюидных включений в кварце и флюорите из гранитов и пегматитов показали, что исходный гранитный расплав был обогащен F (около 19 мас.%) и H<sub>2</sub>O (3,9 мас.%), достигая флюидонасыщения при температуре около 700 °С. Это привело к обособлению в расплаве двух несмешиваемых флюидных фаз: щелочно-фторидно-сульфатного рассола (плотность 1,7—2,1 г/см<sup>3</sup>) и менее плот-



**Рис. 8. Флюидные высококонцентрированные включения фторидно-сульфатных растворов во флюорите из пегматитов (а, б) месторождения Ермаковское, Восточное Забайкалье [Рейф, Ишков, 2003] и многофазные включения во флюорите (в) месторождения Карасуг и в кварце (з) месторождения Улатай.**

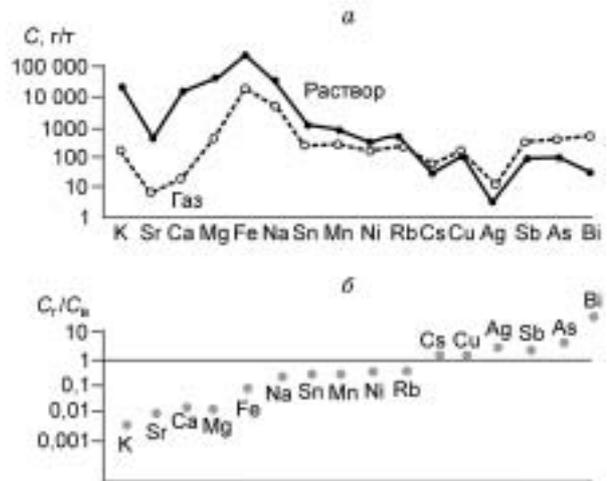
ной ( $0,75\text{--}0,85\text{ г/см}^3$ ) фазы слабоконцентрированного  $\text{CO}_2$ -содержащего раствора. Изучение многофазных кристаллофлюидных включений во флюорите на сканирующем электронном микроскопе позволило установить в них сульфаты и алюмофториды Na и K (рис. 8). В составе фторидно-сульфатных рассолов, по данным лазерного микроспектрального и LA-ICP-MS анализов, установлены высокие содержания Mo, Be, Mn, Fe, Mg, Al.

Окисленные флюиды, содержащие сульфатную и сульфидную серу, установлены и для целого ряда щелочных интрузивных комплексов [Андреева, 2000; Panina, 2005].

Таким образом, выделенные два типа гетерофазных магматогенных флюидов существенно отличаются по составу макро- и микрокомпонентов и физико-химическим параметрам (редокс-потенциал, pH и т. д.), что определяет их разную способность к экстракции тех или иных рудных компонентов при отделении флюидов от расплавов и взаимодействии в системе флюид—порода за пределами магматического очага.

Для гетерофазных включений конкретных типов рудно-магматических систем установлено своеобразное распределение этих компонентов между водно-солевой (кристаллофлюидные включения) и парогазовой (газовые включения) фазами. Характерно, что в составе последней в большей мере накапливаются Cu, Au, Ag, Bi (Cu-Mo-порфировые месторождения), Cu, Ag, Sb, As, Bi (Sn-W месторождения), Be (F-Be месторождения), Cu, Ag, Bi (для Cu-Ni-Pt месторождений), а в водно-солевой фазе — Fe, Mn, Zn, Sn, W, Mo, Ni и другие элементы (рис. 9, см. табл. 1). Причем накопление Cu и As в газовой составляющей гетерофазных флюидов устанавливается вне зависимости от типа РМС и окисленности—восстановленности флюидов, преимущественное накопление Au в газовой фазе характерно в основном для окисленных (Cu-Mo-порфировые и Au-скарновые РМС), а Sb, Ag, Bi — для восстановленных флюидов [Heinrich et al., 1999; Ulrich et al., 1999, 2001; Borisenko et al., 2003; Landtwing et al., 2005]. Коэффициент распределения этих элементов между газовой и водно-солевыми составляющими колеблется от 1 до 50, наибольшее значение установлено для Au на Cu-Mo(Au)-порфировом месторождении Грасберг [Ulrich et

**Рис. 9.** Концентрации рудных и петрогенных элементов в растворах водно-солевых и газовых включений в кварце гранит-порфиров Депутатского Sn-W месторождения (а) и отношения концентраций элементов в водно-солевой ( $C_B$ ) и газовой ( $C_T$ ) фазах (б) по данным изучения флюидных включений на ICP—MS—LA.



al., 1999] (рис. 10). Это, с одной стороны, свидетельствует о разной металлоносности газовой и водно-солевой составляющих магматогенных флюидов, а с другой, при условии их отдельной миграции — о способности отлагать разные по составу минеральные парагенезисы (или типы руд). Важно отметить, что такая специализация состава и металлоносности водно-солевой и газовой фаз закладывается еще на магматическом этапе и определяется *TP*-параметрами их отделения от магматического расплава и его геохимическими особенностями.

Важным фактором металлоносности магматогенных флюидов является содержание рудных элементов в расплавах. Изучение распределения Cu в расплавных включениях в кварце гранит-порфиров колчеданно-полиметаллических [Симонов и др., 2005], Au-Ag, Cu-Мо-порфировых месторождений [Halter et al., 2005; Pavlova et al., 2005] показало, что содержание этого элемента в расплавах достигало весьма высоких значений: 0,1—1,2 мас.% (колчеданно-полиметаллические м-ния до 1,2 мас.%), Au-Ag — 0,4 мас.%, Cu-Мо-порфировые — 0,4—0,9 мас.%. Причем наиболее высокие концентрации Cu устанавливаются в расплавах включений дорудных гранит-порфиров или эффузивных пород, в синрудных или пострудных образованиях они существенно ниже [Симонов и др., 2005; Гаськов и др., 2006; Halter et al., 2002, 2005]. Это указывает на то, что на определенном этапе эволюции рудогенерирующего магматического очага расплавы теряют значительную часть меди, выносимую флюидной фазой.

Таким образом, проведенные исследования и обзор имеющихся литературных данных по составу и металлоносности магматогенных флюидов позволяют сделать следующие выводы:

1. Отделяющиеся от магматических расплавов флюиды на разных уровнях глубинности существенно отличаются по фазовому состоянию: гомогенные надкритические (близповерхностный уровень), гетерофазные (гипабиссальный уровень генерации) и гомогенные газовые флюиды (глубинные нижнекоровые и мантийные).

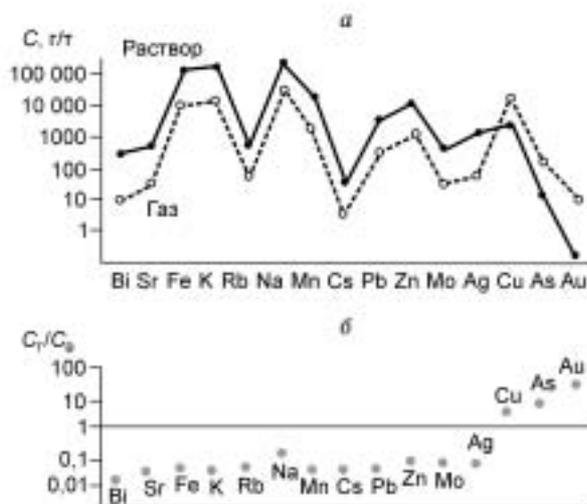
2. На всех уровнях генерации выявляются два типа магматогенных флюидов, отличающихся значениями редокс-потенциала: окисленные и восстановленные.

3. Наиболее высокометаллоносными являются гетерофазные флюиды. В них установлены высокие концентрации рудных компонентов: Fe, Mn (до  $n \cdot 1$ —10 мас.%), Zn, Be, Cu (до  $n \cdot 0,1$ —1 мас.%), Mo, Sn, Pb, As, Sb, Bi, W (до 0,01—0,1 мас.%), а также Ag, Au и других.

4. Для разных геохимических типов РМС устанавливается свой комплекс рудных элементов, отвечающих геохимическому профилю связанного с ними оруденения: Cu, Mo, Au, As, Zn — для Cu-Мо-порфировых РМС, Cu, Sn, Ag, Bi, W, As — для Sn-W-Ag РМС; Be, Mo, F, Zn — для F-Be РМС; Cu, Ni, Fe, Cr — для Cu-Ni-Pt магматических систем и т. д.

5. Важными факторами, определяющими высокую металлоносность магматических флюидов, являются:

— гетерофазное состояние флюидов и высокая экстракционная способность каждой из их составляющих (концентрированный раствор, расплав-рассол и парогазовая фаза) в отношении тех или иных комплексов рудных элементов;



**Рис. 10.** Концентрации (а) элементов в растворах водно-солевых и газовых включений из Cu-Мо(Au) порфирового месторождения Грасберг и отношения (б) концентраций элементов в водно-солевой ( $C_B$ ) и газовой ( $C_T$ ) фазах (по данным [Ulrich et al., 1999]).

— высокие температуры (>700 °С) отделения флюидов от расплавов, при которых коэффициент распределения рудных элементов между флюидом и расплавом составляет от 10 до 50;  
— высокие концентрации рудных элементов в рудоносных расплавах, что достигается во флюидонасыщенных остаточных расплавах (гранит-порфир, пегматиты);  
— динамика отделения магматогенных флюидов от расплава и их фазовое состояние.  
Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 04-05-64339, 05-05-64422), грантов Министерства образования и науки России (РНП. 2.1.1.702) и Президиума СО РАН 6.11.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Андреева И.А.** Силикатные, силикатно-солевые и солевые магмы щелочного карбонатитсодержащего комплекса Мушугай-Худук, Южная Монголия (данные изучения расплавных включений): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., ИГЕМ, 2000, 27 с.

**Бакуменко И.Т., Косухин О.Н.** Вода во включениях силикатных расплавов кислого состава // Докл. АН СССР, 1977, т. 234, № 1, с. 164—167.

**Башарина Л.А.** Вулканические газы на различных стадиях активности вулканов // Тр. лаб. вулканологии, 1961, вып. 19, с. 69—79.

**Бердников Н.В., Приходько В.С.** Углекислотная дегазация щелочно-базальтоидной магмы // Докл. АН СССР, 1981, т. 259, № 3, с. 708—710.

**Борисенко А.С., Боровиков А.А., Поспелова Л.Н.** Исследование состава растворов флюидных включений методами криометрии и микрорентгеноспектрального анализа // Геология и геофизика, 1994, т. 35 (11), с. 22—27.

**Борисенко А.С., Сотников В.И., Боровиков А.А., Берзина А.Н., Гимон В.О.** Углерод в редкометалльных рудно-магматических системах // Геодинамика и эволюция Земли (Материалы научн. конф.). Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ СО РАН, 1996, с. 147—149.

**Борисенко А.С., Холмогоров А.И., Боровиков А.А., Шебанин А.П., Бабич В.В.** Состав и металлоносность рудообразующих растворов Депутатского оловорудного месторождения (Якутия) // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (11), с. 1830—1841.

**Боровиков А.А., Житова Л.М., Борисенко А.С., Неволько П.А.** Флюидные включения в кварце Рустенбургской расслоенной ультрабазит-базитовой серии // Материалы XII междунар. совещания по термобарогеохимии. Александров, ВНИИСИМС, 2005, с. 145—150.

**Возняк Д.К., Квасница В.Н.** Необычные включения минералообразующей среды — включения раскристаллизованного солевого расплава // Геохимия, 1988, № 11, с. 1661—1665.

**Гаськов И.В., Симонов В.А., Ковязин С.В.** Эволюция физико-химических параметров и геохимических особенностей магматических расплавов в процессе развития колчеданных рудно-магматических систем Рудного Алтая и Тувы // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (12), с. 1360—1370.

**Доровский В.Н.** Характерные времена экстракции примесных частиц из магматического расплава в присутствии поверхностно-активных веществ // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (5), с. 626—638.

**Житова Л.М., Борисенко А.С., Боровиков А.А., Неволько П.А.** Состав и металлоносность магматогенных флюидов интеркумулусной стадии кристаллизации рифа Меренского бушвельдского комплекса, ЮАР // Актуальные проблемы рудообразования и металлогении (Тезисы докл. Междунар. совещания). Новосибирск, Академич. изд-во „Гео“, 2006, с. 86—87.

**Коваленкер В.А., Наумов В.Б., Прокофьев В.Ю.** Гетерогенизация флюидов как один из факторов отложения продуктивных ассоциаций при формировании золоторудных и золото-серебряных месторождений // Минералообразование из вскипающих растворов. Пермь, Изд-во Перм. ун-та, 1988, с. 217—218.

**Коваленко В.И., Наумов В.Б., Богатиков О.А.** Природные силикатные и солевые расплавы, флюиды и связанное с ними оруденение // Геология и геофизика, 1986 (7), с. 52—55.

**Летников Ф.А.** Магмообразующие флюидные системы // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (12), с. 1262—1270.

**Летников Ф.А.** Флюидный режим эндогенных процессов и проблемы рудогенеза // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (12), с. 1296—1307.

**Летников Ф.А., Карпова И.К., Киселева А.И., Шкандрий Б.О.** Флюидный режим земной коры и верхней мантии. М., Наука, 1977, 214 с.

**Меняйлов И.А., Никитина А.П., Шапарь В.Н., Гусева Р.В., Миклиский А.З., Колотов В.П., Савельев Б.В.** Химизм и металлоносность магматических газов новых Толбачинских вулканов в 1976 г. // Докл. АН СССР, 1977, т. 236, № 2, с. 450—453.

**Набоко С.И.** Металлоносность современных гидротерм в областях тектономагматической активизации. М., Наука, 1980, 198 с.

**Наумов В.Б., Шапенко В.В.** Концентрация железа в высокотемпературных хлоридных растворах по данным изучения флюидных включений // *Геохимия*, 1980, № 2, с. 231—238.

**Наумов В.Б., Шапенко В.В.** Метан в гидротермальных растворах, формирующих месторождения олова и вольфрама // *Геохимия*, 1984, № 9, с. 1335—1341.

**Наумов В.Б., Соловова И.П., Прокофьев В.Ю., Коваленкер В.А., Кононова Н.Н.** Концентрация Ag и Te в высокотемпературных растворах по данным изучения флюидных включений // *Докл. АН СССР*, 1988, т. 301, № 4, с. 965—968.

**Наумов В.Б., Соловова И.П., Коваленкер В.А., Русинов В.Л., Прокофьев В.Ю.** Условия кристаллизации и составы силикатных и солевых расплавов вулканоплутонического комплекса Приангренского района (Средняя Азия) // *Докл. АН СССР*, 1990, т. 312, № 5, с. 1227—1230.

**Наумов В.Б., Миронова О.Ф., Коваленкер В.А., Салазкин А.Н., Русинов В.Л.** Магматический азот и его участие в эпitherмальном рудообразовании // *Докл. РАН*, 1992, т. 322, № 5, с. 973—976.

**Наумов В.Б., Коваленкер В.А., Мызников И.К., Салазкин А.Н., Миронова О.Ф., Савельева Н.И.** Высокобарические флюиды гидротермальных жил Рябиновского щелочного массива (Центральный Алдан) // *Докл. РАН*, 1995, т. 343, № 1, с. 99—102.

**Прокофьев В.Ю., Борисенко А.С., Боровиков А.А., Кононов О.В.** Состав высокотемпературных хлоридных рассолов: исследование флюидных включений во флюорите месторождения Тырнауз (Северный Кавказ) // *Петрология и рудоносность регионов СНГ и Балтийского щита (Материалы X всероссийского и международного петрографического совещания „Петрография XXI века“, Апатиты, 20—22 июня 2005)*. Апатиты, 2005, с. 229—231.

**Рейф Ф.Г.** Микроэмульсионное состояние флюидонасыщенных гранитных магм: признаки и петрологические следствия // *Докл. АН СССР*, 1984, т. 276, № 5, с. 1197—1201.

**Рейф Ф.Г., Ишков Ю.М.** Несмешиваемые фазы гетерогенного магматического флюида, их рудная специализация и раздельная миграция при формировании Ермаковского F-Be месторождения // *Докл. РАН*, 2003, т. 390, № 3, с. 1—3.

**Рейф Ф.Г., Прокофьев В.Ю., Боровиков А.А., Борисенко А.С., Стельмачонок К.З., Пахомова В.А., Смирнов С.З., Бакуменко И.Т., Гимон В.О., Берзина А.П., Степанов С.Н., Кормушин В.А., Карпухина В.С., Ишков Ю.М.** О концентрации металлов в рудообразующих растворах // *Докл. РАН*, 1992, т. 325, № 3, с. 585—589.

**Реддер Э.** Лабораторные исследования включений в минералах гранитных блоков о. Вознесения и их петрологическое значение // *Проблемы петрологии и генетической минералогии*, Т. 11. М., Наука, 1970, с. 247—258.

**Реддер Э.** Флюидные включения в минералах, Т. 2. М., Мир, 1987, 630 с.

**Симонов В.А., Гаськов И.В., Ковязин С.В., Борисенко А.С.** Эволюция геохимических параметров кислых расплавов при формировании колчеданных месторождений Рудного Алтая // *Докл. РАН*, 2005, т. 403, № 5, с. 674—677.

**Смирнов С.З., Перетяжко И.С., Загорский В.Е., Михайлов М.Ю.** Включения необычных позднемагматических расплавов в кварце пегматитовой жилы Октябрьская (Малханское поле, Центральное Забайкалье) // *Докл. РАН*, 2003, т. 392, № 2, с. 239—243.

**Соболев Н.В., Овчинников Ю.И., Родионов А.С.** Включения в мегакристаллах клинопироксенов из вулканической брекчии Каканун, Новая Зеландия // *Тезисы докладов VI всесоюзного совещания по термобарогеохимии*. Владивосток, ИГ ДВНЦ, 1978, с. 107.

**Томиленко А.А.** Флюидный режим минералообразования в континентальной литосфере при высоких и умеренных давлениях по данным изучения флюидных и расплавных включений в минералах: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Новосибирск, ИМиП СО РАН, 2006, 33 с.

**Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975—1976** / Ред. С.А. Федотов. М., Наука, 1984, 637 с.

**Шарапов В.Н., Перепечко Ю.В., Мазуров М.П.** Мантийно-коровые флюидно-магматические системы зон спрединга // *Геология и геофизика*, 2006, т. 47 (12), с. 1326—1343.

**Audétat A., and Pettke T.** The magmatic-hydrothermal evolution of two barren granites: a melt and fluid inclusion study of the Rito del Medio and Canada Pinabete plutons in northern New Mexico (USA) // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2003, v. 67, p. 97—121.

**Audétat A., Günter D., Heinrich C.A.** Causes for large-scale metal zonation around mineralized plutons: Fluid inclusion LA-ICP-MS evidence from the Mole Granite, Australia // *Econ. Geol.*, 2000 a, v. 96, p. 1563—1581.

**Audétat A., Günter D., Heinrich C.A.** Magmatic-hydrothermal evolution in a fractionating granite. A microchemical study of the Sn-W-F-mineralized Mole Granite (Australia) // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2000 b, v. 64, p. 3373—3393.

**Baker T., Van Achterberg E., Ryan C.G., Lang J.R.** Composition and evolution of ore fluids in a magmatic-hydrothermal skarn deposit // *Geology*, 2004, v. 32, p. 117—120.

**Ballhaus C.G., Stumpfl E.F.** Sulfide and platinum mineralization in the Merensky Reef: evidence from hydrous silicates and fluid inclusions // *Contr. Miner. Petrol.*, 1986, v. 94, p. 193—204.

**Bernard A.** Les mecanismes de condensation des gaz volcaniques — chimie mineralogy et equilibre des phases condensees majeures et mineures. Unpublished Ph. D. thesis, Belgium, University of Brussels, 1985, 195 p.

**Bodnar R.J.** Fluid inclusion evidence for a magmatic source for metals in porphyry copper deposits // *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, 1995, v. 23, p. 139—152.

**Borisenko A.S., Borovikov A.A., Babich V.V.** Specific compositional features of ore-forming fluids at Deputatskoye deposit (Yakutia) // *Proceedings of ECROFI XIV*. Nancy, France, 1997, p. 52—53.

**Borisenko A.S., Pavlova G., Borovikov A.A., and Babich V.V.** Silver in endogenic fluids of Sn-Ag ore-forming systems // *ECROFI XV Abstracts*. Terra Nostra, 1999, № 6, p. 47—49.

**Borisenko A.S., Borovikov A.A., Pavlova G.** Ore-forming hydrothermal systems of Sn-Ag ore provinces // *Proceedings of ECROFI XVI*. Porto, Memoria, 2001, p. 57—60.

**Borisenko A.S., Borovikov A.A., Pavlova G., Naumov E., Anoshin G., Paleskiy S.** Ore elements distribution in heterogenous fluids of rare-metal deposits // *ECROFI XVII*, Budapest. ACTA Mineralogica-Petrographica Abstract Series, 2003, v. 2, p. 29—30.

**Borisenko A.S., Borovikov A.A., Reif F.G.** Analysis of fluid inclusions using modern techniques and problems of data interpretation // *Metallogeny of the Pacific Northwest: tectonics, magmatism and metallogeny of active continental margins: Proceed Interim IAGOD Conf*. Vladivostok, Dalnauka, 2004, p. 281—283.

**Durisova J., Charoy B., Weisbrod A.** Fluid inclusion study in minerals from tin and tungsten deposits in the Krusne Hory Mountains (Czechoslovakia) // *Bull. Miner.*, 1979, v. 102, p. 665—675.

**Gemmel J.B.** Geochemistry of metallic trace elements in fumarole condensates from Nicaraguan and Costa Rican volcanoes // *J. Volc. Geotherm. Res.*, 1987, v. 33, p. 161—181.

**Halter W.E., Pettke T., Heinrich C.A., Rothen-Rutishauser B.** Major to trace element analysis of melt inclusions by laser-ablation ICP-MS: methods of quantification // *Chem. Geol.*, 2002, v. 183, p. 63—86.

**Halter W.E., Heinrich C.A., Pettke T.** Magma evolution and the formation of porphyry Cu-Au ore fluids: evidence from silicate and sulfide melt inclusions // *Miner. Depos.*, 2005, v. 39, № 8, p. 845—863.

**Hanley J.J., Mungall J.E., Spooner E.T.C.** Fluid and melt inclusion evidence for platinum-group element transport by high salinity fluids and halide melts below the J-M reef, Stillwater Complex, Montana, U.S.A. // *Extended abstracts of the X International Platinum Symposium*. Oulu, Finland, 2005a, p. 94—97.

**Hanley J.J., Mungall J., Pettke T., Spooner E.T.C., Bray C.J.** Ore metal redistribution by hydrocarbon-brine and hydrocarbon-halide melt phase, North Range footwall of the Sudbury Igneous Complex, Ontario, Canada // *Miner. Depos.*, 2005b, v. 40, p. 237—256.

**Heinrich C.A.** The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: a thermodynamic study // *Miner. Depos.*, 2005, v. 39, p. 864—889.

**Heinrich C.A., Ryan C.G., Mernagh T.P., Eadington P.J.** Segregation of ore metals between magmatic brine and vapor: a fluid inclusion study using PIXE microanalysis // *Econ. Geol.*, 1992, v. 87, p. 1566—1583.

**Heinrich C.A., Günter D., Audétat A., Ulrich T., Frischknecht R.** Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by microanalysis of fluid inclusions // *Geology*, 1999, v. 27, p. 755—758.

**Höll R., Borisenko A., Obolenskiy A., Grechishev O., Scherbakov Yu.** Sn and Ta granitoid-related ore-magmatic systems: Deputatsky and Ulug-Tanze deposits, Russia // *Ore-bearing granites of Russia and adjacent countries*. Moscow, IMGRE, 2000, p. 127—141.

**Jackson N.J., Moore J. McM., Rankin A.H.** Fluid inclusions and mineralization at Cligga Head, Cornwall, England // *J. Geol. Soc.*, 1977, v. 134, p. 343—349.

**Kamenetsky V.S., Van Achterberg E., Ryan C.G., Naumov V.B., Mernagh T.P., Davidson P.** Extreme chemical heterogeneity of granite-derived hydrothermal fluids: an example from inclusions in a single crystal of miarolitic quartz // *Geology*, 2002, v. 30, № 5, p. 459—462.

**Kinnaird J.A., Kruger F.J., Nex P.A.M.** Excursion Guide to the Bushveld Igneous Complex // *Geoscience Africa*. Johannesburg, University of the Witwatersrand, 2004, p. 1—23.

**Landtwing M.R., Heinrich C.A., Pettke T., Halter W.E., Redmond P.B., Einaudi M.N., Kunze K.** Copper deposition during quartz dissolution by cooling magmatic-hydrothermal fluids: the Bingham porphyry // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2005, v. 235, p. 229—243.

**Le Guern F.** Ecoulements gazeux reactifs a hautes temperatures, mesures et modelisation: unpublished Ph. D. thesis. Paris, University of Paris, 1988, 314 p.

**Panina L.I.** Multiphase carbonate-salt immiscibility in carbonatite melts: data on melt inclusions from the Krestovskiy massif minerals (Polar Siberia) // *Contr. Miner. Petrol.*, 2005, v. 150, № 1, p. 19—36.

**Pavlova G., Borovikov A., Borisenko A., Kuchkin A., Fadda S., Fiori M., Grillo S.** Fluid and melt inclusions in porphyry-epithermal system of Furtei gold deposit (Sardinia, Italy). ECROFI, Siena 6—9 July, 2005 /CD-ROM/

**Reif F.G.** Direct evolution of W-rich brines from crystallizing melt within the Mariktikan granite pluton, west Transbaikalia // *Miner. Depos.*, 1997, v. 32, p. 475—490.

**Reif F.G., Damdinova L.V., Ishkov Y.M., Karmanov N.S.** Diverse specialization of ore-forming fluid flow simultaneously produced by a single granite intrusion. The Yermakov Fe-Be deposit, Transbaikalia, Russia // *Metallogeny of the Pacific Northwest: tectonics, magmatism and metallogeny of active continental margins: Proc. Interim IAGOD Conf. Vladivostok, Dalnauka*, 2004, p. 314—317.

**Rusk B., Reed M.H., Dilles J.H., Klemm L.** Compositions of magmatic-hydrothermal fluids determined by LA-ICP-MS of fluid inclusions from the porphyry copper-molybdenum deposit at Butte, Montana // *Chem. Geol.*, 2004, v. 210, p. 173—199.

**Roedder E.** Fluid inclusions. *Mineral. Soc. Amer., Reviews in Mineralogy*, 1984, v. 12, 644 p.

**Sugaki A., Kojima S., Shimada N.** Fluid inclusion studies of the polymetallic hydrothermal ore deposits in Bolivia // *Miner. Deposita*, 1988, v. 23, № 1, p. 9—15.

**Symonds R.B., Rose W.I., Reed M.N., Lichte F.E., Finnegan D.L.** Volatilization, transport and sublimation of metallic and non-metallic elements in high temperature gases at Meragi volcano, Indonesia // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1987, v. 51, p. 2083—2101.

**Symonds R.B., Rose W.I., Bluth G.J., Gerlach T.M.** Volcanic-gas studies: methods, results, and applications // *Rev. Miner.*, 1994, v. 30, p. 1—66.

**Taran Y.A., Hedenquist J.W., Korzhinsky M.A., Tkachenko S.I., Shmulovich K.I.** Geochemistry of magmatic gases from Kudryavy volcano, Iturup, Kuril Islands // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, v. 59, p. 1749—1761.

**Taran Y.A., Bernard A., Gavilanes J.-C., Africano F.** Native gold in mineral precipitates from high-temperature volcanic gases of Colima volcano, Mexico // *Appl. Geochem.*, 2000, v. 15, p. 337—346.

**Ulrich T., Günter D., Heinrich C.A.** Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits // *Nature*, 1999, v. 388, p. 676—679.

**Ulrich T., Günter D., Heinrich C.A.** Evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions, Bajo de la Alumbrera, Argentina // *Econ. Geol.*, 2001, v. 96, p. 1743—1766.

**Ulrich T., Golding S.D., Kamber B.S., Khin Zaw, Taube A.** Different mineralization styles in a volcanic-hosted ore deposit: the fluid and isotope signatures of the MT Morgan Au-Cu deposit, Australia // *Ore Geol. Rev.*, 2002, v. 22, p. 61—90.

**Vladimirov A.G., Borisenko A.S., Rudnev S.N., Chupin V.P., Kruk N.N., Titov A.V., Borovikov A.A., Pavlova G.G., Averkin Yu.A., Turkina O.M., Vladimirov A.G., Mortsev N.K.** Ore-bearing granite plutons of the Southern Pamir, Tajikistan // *Ore-bearing granites of Russia and adjacent countries. Moscow, IMGRE*, 2000, p. 331—348.

**Williams-Jones A.E., Heinrich C.A.** Vapor transport of metals and the formation of magmatic-hydrothermal ore deposits // *Econ. Geol.*, 2005, v. 100, № 7, p. 1287—1312.

**Zhitova L.V., Rakhmenkulova I. F., Borisenko A.S. et al.** The factors of precious metal concentrations in sulfide ores of the Chineisky Massif (Transbaikalia Region, Russia) // *Abstracts of Geoscience Africa. University of the Witwatersrand. Johannesburg, South Africa*, 2004, v. 2, p. 740—741.

**Zhitova L.V., Borisenko A.S., Borovikov A.A.** The Bushveld Complex magmatogene fluids: evolution from the Merensky Reef to latest Qtz-Fsp pegmatite veins // *21st Colloquium of African Geology (Maputo, Mozambique, 2—7 July, 2006): Abstract Book. Maputo, Mozambique*, 2006, p. 178—180.

*Поступила в редакцию  
30 июня 2006 г.*