

# МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ РУДОНОСНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ВУЛКАНОГЕННЫХ ФЛЮИДНЫХ СИСТЕМ КАМЧАТКИ

Г.А. Карпов<sup>1</sup>, Ю.В. Алехин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Современные вулканогенные флюидные системы тяготеют к определенным вулканотектоническим структурам, отражая динамику вещества глубинных геосфер в зонах высокой тектоно-магматической активности. Помимо собственно вулканических эксгаляций и эманаций (фумарол, сольфатар), приуроченных к очагам разгрузки магматических расплавов как непосредственно во время извержения, так и в постмагматическую стадию, они проявляются в виде грязевых котлов, термальных источников и гейзеров, в составе свободных газов которых нередко обнаруживаются высокие содержания водорода, гелия, углеводородов [Рожков, 1979; Кононов, 1983]. Наибольший интерес с генетических позиций вызывают рудоносные флюиды – магматические газы и газо-водные растворы, содержащие рудные компоненты.

## Современные рудоносные флюидные системы действующих вулканов Камчатки

В мировой геохимической литературе до 80-х годов XX в. было очень мало данных по металлоносности высокотемпературных вулканических газов. Мощное Толбачинское извержение 1975-76 гг. позволило отобрать пробы вулканических газов и их конденсатов при температурах до 1000 градусов и получить надежные количественные определения содержаний в них большого ряда химических элементов, включая Zn, Cu, Pb, Au, Ag, Pt. Практически впервые были определены масштабы выноса элементов вулканическими эксгаляциями – производными расплава магнезиальных базальтов, поступавших на поверхность с большой скоростью из области верхней мантии [Меняйлов и др., 1980; 1984]. Дифференциация многокомпонентной газовой фазы в приповерхностных условиях кратерной зоны на Северном прорыве Большого трещинного Толбачинского извержения, обусловленная различной растворимостью летучих соединений в силикатном расплаве, их температуры кипения и упругости паров, привела к концентрированию определенных соединений элементов и образованию рудопроявлений меди, цинка и других металлов [Вергасова и др., 1984]. В составе эксгаляционных рудных минералов были отмечены самородные металлы – золото, серебро, медь, свинец, висмут, вольфрам многочисленные интерметаллические соединения, сульфаты, окисульфаты, хлориды и оксихлориды Cu, Zn, Pb, Fe, Al, V, Te, Se, Bi, оксиды железа и меди [Вергасова и др., 1982; Главатских, 1990; Главатских, Трубкин, 2000]. Образование золота было зафиксировано в интервале температур 180-625<sup>0</sup> С. Оно встречается в виде единичных кристаллов с контурами гексагонов, трапеций и треугольников или незначительных скоплений кристаллов тонкопластинчатого, игольчатого, до волосовидного габитуса. Размеры индивидов золота варьируют от 250 x 50 x 10 мкм до 0,3 мм в поперечнике, при толщине порядка 0,01-0,005 мм. Отмечались классические формы быстрого роста индивидов золота из газовой фазы. На фумарольных полях очень быстро сформировались фторметасоматиты сложного состава, также несущие рассеянную рудную минерализацию [Набоко, Главатских, 1984]. В 2000 г. появилась публикация об обнаружении самородного золота в эксгаляциях из 800-градусной фумаролы на вулкане Колима в Мексике [Taran et al., 2000]. Доказательством осуществления переноса рудных компонентов современными магматогенными флюидными системами является и обнаружение большого числа рудных образований в пеплах действующих вулканов. Так, нами в эруптивных пеплах вулканов Камчатки – Карымского, Безымянного, Ключевского и Шивелуча обнаружены многочисленные зерна самородных металлов – Fe, Al, Zn, Cu, оксидов железа [Карпов и др., 1999; Карпов, Мохов, 2004], а в последнее время также сульфидов железа и интерметаллических соединений Fe, Ni, Cr, Mo, Mn. Зерна самородных металлов обычно представлены обособленными изометричными частичками с неровными краями размером 20-150 мкм или лентовидными агрегатами того же размера, сложенными из наноразмерных частиц порядка 0,2 мкм. Для оксидов и сульфидов железа, а также для довольно часто встречающихся индивидов самородного железа и стекла наиболее характерна глобулярная форма образований, которая может быть обусловлена вихревой обстановкой в зоне транспорта и тонкодисперсным состоянием высокотемпературного расплавленного магматического вещества, насыщенного

газами. Лентовидные одноэлементные образования, сложенные из наноразмерных частиц, по-видимому, формируются при несколько меньших давлениях и температуре за счет большой поверхностной энергии наночастиц, облегчающей присоединение однотипных кластеров. При визуальных наблюдениях за режимом деятельности Карымского вулкана в 2000-2003 гг. мы отмечали фазы перемежающихся (реже одновременных) выбросов парагазовой (светлого цвета) и пеплово-бомбово-парагазовой (темного цвета) смесей вещества. Судя по обычно наблюдаемому изменению яркости свечения вещества в кратере Карымского вулкана, наличие в его пеплах высоко- и низкотемпературных самородных металлов, а также по периодическому изменению цветности материала пеплов (от светлосерого до темного), можно предположить и широкие вариации температуры в магматическом канале. Эти данные интерпретируются нами как свидетельство наличия большого количества воды и свободного водорода в составе флюидной фазы [Карпов, Мохов, 2004]. Согласно экспериментам [Летников, Большев, 1991] «воздействие водно-водородного флюида приводит к осветлению пород, снижает степень их побурения за счет развития оксидов и гидрооксидов элементов переменной валентности». На высокое содержание воды и водорода в составе магматической газовой фазы при извержении на Северном прорыве БТТИ обращено внимание и в работе [Меняйлов и др., 1980], где подсчитано, что в составе эруптивных газов за время этого извержения было выброшено  $1,2 \times 10^8$  т  $H_2O$  и  $5,4 \times 10^5$  т  $H_2$ .

### **Современные рудоносные вулканогенные гидротермальные системы Камчатки**

Развитие теории гидротермального рудогенеза тесно связано с успехами геохимии современных гидротермальных систем – континентальных и подводных, океанических. Геохимическая специализация гидротермальных систем областей современного вулканизма интенсивно изучается во всем мире [Лебедев, 1975; Набоко, 1980; Эллис, 1982; Кононов, 1983; Пампура, 1985; Озерова, 1986; Карпов, 1988; Уайт, 1965; Weissberg, 1969; Nakagawa, 1971; Hedenquist, Henley, 1985; Giggenbahr, 1997]. Камчатка, особенно ее Восточный вулканический пояс, является классическим примером региона островодужного типа, характеризующегося аномально-высоким тепловым потоком, широким развитием современного вулканизма, проявлениями многочисленных современных гидротермальных систем (их здесь более 250) и повышенной сейсмичностью. Гидротермальные системы Камчатки, в большинстве своем, приурочены к грабенам, кольцевым вулканотектоническим депрессиям и кальдерам (заполненным плиоцен-четвертичными вулканогенно-осадочными отложениями), пространственно и генетически тяготеющим к магматическим очагам с контрастным типом вулканизма (базальты – дациты, игнимбриты) [Карпов, 1988; Леонов, 1989]. Предполагается, что они связаны с длительно-живущими коровыми магматическими очагами, имеющими связь с верхней мантией [Луговая и др., 1987; Карпов, Ильин, 2006]. По результатам исследований более 30 высокотемпературных гидротермальных систем Камчатки нами получены следующие геохимические данные. – 1. Фосфор, в количествах превышающих его содержание в морской воде, присутствует в единичных субнейтральных и ультракислых источниках. 2. Алюминий, железо и марганец наблюдаются во всех изученных термопроявлениях, с максимумом в кислых термах. 3. Практически повсеместно в термах имеются As, Sb, W, Mo, Br, Ba, Zn, Cu, Sr, Ge, Li, Rb, Cs, Y, Zr. 4. Tl, Th и U обнаружены только в кислых термах кратерного озера Троицкое (вулкан Малый Семячик). 5. Аномально- высокие содержания Br, Ba, Sr и Hg отмечены только в одном термопроявлении (Кеткинские источники). 6. Редкоземельные элементы – лантаноиды присутствуют повсеместно, но только в кислых водах кратерного озера Троицкое их содержания на 2-3 порядка превосходят другие термы. 7. Pt и Pd обнаружены только в двух источниках, которые возникли после подводного извержения в кальдере Академии Наук в 1996 г. Как можно трактовать полученные данные? Если исходить только из концепции выщелачивания элементов в системе вода-порода, то логично было бы ожидать наличие фосфора во всех термах, т.к. он постоянно присутствует в магматических породах. Избирательное же его нахождение пока не находит своего объяснения. Повсеместное нахождение Al, Fe и Mn во всех типах термальных вод, по всей вероятности, отражает геохимическую специализацию магматических очагов. Кроме того, марганец, по-видимому, является индикатором повышенной мощности гранитно-метаморфического слоя земной коры и наряду с гидрокарбонат-ионом проявляется в повышенных содержаниях в растворах, выходящих в тектонически-опущенных глыбах. Высокие содержания As, Sb, в некоторых случаях Hg обычно наблюдаются в близонейтральных или кислых термах преимущественно хлоридно-натриевого состава. С субщелочными термами того же состава связаны высокие

содержания Li, Rb и Cs, отношения которых в этих термах выдерживаются в пропорции 88:8(5) : 4(7). В генетическом плане интересны содержания в термах редкоземельных элементов – лантаноидов. Отношение La/Y в андезитах Карымского вулкана, например, равно 0,7. В четвертичных базальтах оно равно 0,6. В термах кальдеры Академии Наук, в том числе и в новообразованных после подводного извержения 1996 г., это отношение выдерживается в пределах 0,5-0,7, что может свидетельствовать о генетической связи этих терм с очагом базальтовой магмы. Отношение La/Yb в кислых изверженных породах Восточной Камчатки колеблется в пределах 2,8-7,5. В рудообразующих термах кальдеры Узон оно варьирует от 1,3 до 3,1 и мы связываем генезис вещества этих терм с магматическим очагом, обусловившим формирование дацитовой экструзии г. Белой.

#### **Основные выводы**

Анализ материала по наиболее изученному Большому трещинному Толбачинскому извержению, а также обнаружение рудного вещества в пеплах действующих вулканов Камчатки позволяет сделать вывод о том, что современные магмогенные флюиды несут рудную нагрузку, т.е. являются рудоносными [Набоко и др., 2001]. В этой связи следует обратить внимание на очень важное замечание авторов [Меняйлов и др., 1980], которые писали, что вынос летучих и халькофильных элементов (включая Pt и Pd) в составе газовой фазы извержения был значительно выше содержания этих элементов в базальтах Северного прорыва БТТИ, что может свидетельствовать об обособлении флюидной фазы в процессе эволюции при ее подъеме в верхние горизонты земной коры. При этом, флюидная фаза обогащалась летучими и халькофильными элементами, которые затем, в приповерхностной зоне, при спаде давления и температуры, формировали зоны оруденения.

Гидротермы современных камчатских гидротермальных систем, в большинстве своем, имеют низкое содержание рудных элементов. Это, по нашему мнению, объясняется исключительно высокой обводненностью территории атмосферными осадками. Но тепловое и вещественное питание современных гидротермальных систем осуществляется флюидными потоками современных магматических очагов, которые как и в прошлые металлогенические эпохи имеют большой рудоносный потенциал. В силу определенных геолого-структурных особенностей территории глубинные рудоносные гидротермы (производные магмогенных флюидных систем) не доходят до поверхности. Рудообразование с их участием происходит на больших глубинах, отвечающих эпитермальным условиям. К поверхности подходят практически отработанные гидротермы. Тем не менее, они производят классические метасоматические изменения боковых пород, свойственные ореолам эпитермальных месторождений [Набоко, 1962]. В этих породах, например, в кварц-адуляровых метасоматитах на Паужетском месторождении гидротерм и в кальдере Узон отмечается до 2 г/т Au. Следы золота обнаруживаются и в опалитах и гейзеритах Долины Гейзеров, Апапеля и в других современных термопроявлениях. В приповерхностных зонах этих гидротермальных систем отлагаются рудные минералы As, Sb, Hg [Карпов, 1978, 1988, 1991; Карпов, Павлов, 1976]. По нашему мнению, о наличии эпитермального оруденения на глубине в современных гидротермальных системах могут свидетельствовать следующие критерии: 1. Высокая концентрация в газогидротермах восстановленных газовых компонентов – He, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> – как движущего фактора рудоносных флюидных систем. 2. Высокое содержание в растворах высокоподвижной триады химических элементов – As, Sb, Hg, что проявляется в формировании близповерхностных зон аналогичного оруденения. Необходимым фактором, обуславливающим рудообразующий процесс, является также контрастный вулканизм (базальты, дациты, игнимбриты) – как свидетельство глубокой дифференциации вещества в магматических очагах.

#### **Список литературы**

- Вергасова Л.П., Набоко С.И., Серафимова Е.К.** Эксгаляционное золото // Докл. АН СССР. 1982. Т. 264. № 1. С. 201-203.
- Вергасова Л.П., Серафимова Е.К., Главатских С.Ф.** Минералогия и геохимия возгонов // Сб. Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка. 1975-1976. Москва: Наука, 1984. С. 341-355.
- Главатских С.Ф.** Самородные металлы и интерметаллические соединения в продуктах эксгаляций Большого трещинного Толбачинского извержения (Камчатка) // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. № 2. С. 433-437.

**Главатских С.Ф., Трубкин Н.В.** Первые находки самородных вольфрама и серебра в продуктах эксгаляций Большого трещинного Толбачинского извержения (Камчатка) // Докл. РАН. 2000. Т. 373. № 4. С. 523-526.

**Карпов Г.А., Павлов А.Л.** Узон-Гейзерная гидротермальная рудообразующая система Камчатки (физико-химический очерк). Новосибирск. Наука, 1976. 99 с.

**Карпов Г.А.** Кальдера Узон – пример современной рудообразующей системы // Гидротермальный процесс в областях тектоно-магматической активности. М.: Наука, 1978. С. 163-172.

**Карпов Г.А.** Современные гидротермы и ртутно-сурьмяно-мышьяковое оруденение. Москва. Наука, 1988. 183 с.

**Карпов Г.А.** Узон-Вайотапский тип комплексного ртутно-сурьмяно-мышьякового оруденения в современных гидротермальных системах // Геология рудных месторождений, 1991. № 3. С. 3-21.

**Карпов Г.А., Штеренберг Л.Е., Золотарев Б.П. и др.** Рудные минералы в пеплах вулкана Карымский (извержение январь 1996 г.) // Вулканология и сейсмология, 1999. № 2. С. 24-28.

**Карпов Г.А., Мохов А.В.** Акцессорные самородные рудные минералы эруптивных пеплов андезитовых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология, 2004. № 4. С. 41-49.

**Карпов Г.А., Ильин В.А.** Онтогенез гидротермального процесса (происхождение и развитие). Владивосток. Дальнаука, 2006. 158 с.

**Кононов В.И.** Геохимия термальных вод областей современного вулканизма (рифтовых зон и островных дуг). М.: Наука, 1983. 212 с.

**Лебедев Л.М.** Современные рудообразующие гидротермы. М.: Недра, 1975. 216 с.

**Леонов В.Л.** Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989. 94 с.

**Летников Ф.А., Балышев С.О.** Петрофизика и геоэнергетика тектонитов. Новосибирск. Наука, 1991. 147 с.

**Луговая И.П., Карпов Г.А., Загнитко В.Н., Березовский Ф.И.** Происхождение спонтанных газов и термальных вод гидротермальной системы Узон (Камчатка) по изотопным данным // Советская геология, 1987. № 10. С. 99-107.

**Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н.** Геохимические особенности эксгаляций Большого трещинного Толбачинского извержения. Москва. Наука, 1980. 234 с.

**Меняйлов И.А., Никитина А.П., Шапарь В.Н.** Геохимические особенности вулканических газов // Сб. Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка. 1975-1976. Москва. Наука, 1984. С. 285-308.

**Набоко С.И.** Формирование современных гидротерм и метаморфизм растворов и пород // Вопросы вулканизма. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 52-62.

**Набоко С.И.** Металлоносность современных гидротерм в областях тектоно-магматической активности. Москва. Наука, 1980. 199 с.

**Набоко С.И., Главатских С.Ф.** Постэруптивный процесс // Сб. Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка. 1975-1976. Москва. Наука, 1984. С. 309-340.

**Набоко С.И., Золотарев Б.П., Карпов Г.А., Ерошев-Шак В.А., Артамонов А.В.** Рудообразующие флюидные системы Большого трещинного Толбачинского извержения 1975-1976 гг. и впадины Атлантис II Красноморского рифта // Вулканология и сейсмология, 2001. № 1. С. 5-23.

**Озерова Н.А.** Ртуть и эндогенное рудообразование. М.: Наука, 1986. 232 с.

**Пампура В.Д.** Геохимия гидротермальных систем областей современного вулканизма. Новосибирск. Наука, 1985. 152 с.

**Рожков А.М.** Газовый состав, радиоактивность Rn, изотопные отношения  $^3\text{He}/^4\text{He}$  как показатель условий формирования и разгрузки термальных вод кальдеры Узон (Камчатка) // Вулканология и сейсмология, 1979. № 6. С. 30-40.

**Уайт Д.Е.** Термальные воды вулканического происхождения // Геохимия современных поствулканических процессов. М.: Мир, 1965. С. 78-100.

**Эллис А.Дж.** Исследованные геотермальные системы // Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М.: Мир, 1982. С. 497-534.

**Hedenquist J., Henley R.M.** Hydrothermal eruption in the Waiotapu geothermal system, New Zealand, their origin, associated breccias and relation metal mineralization // *Econ. Geol.* 1985. V. 80. P. 1640-1668.

**Taran Yu.A., Bernard A., Gavilanes J.C., Africano F.** Native gold in mineral precipitates from high-temperature volcanic gases of Colima volcano. Mexico // *Applied Geochemistry*. 15 (2000). P. 337-346.

**Weissberg B.G.** Gold-silver ore-gsde precipitates from New Zealand thermal waters // *Econ. Geol.* 1969. V. 64. P. 574-592.