

БАЛАНС ХЛОРА И НЕКОТОРЫХ РУДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (Zn, Pb) МЕЖДУ ФЛЮИДНОЙ ФАЗОЙ И РАСПЛАВОМ ПРИ ДЕГАЗАЦИИ ГРАНИТНЫХ МАГМ

Луканин О.А., Дернов-Пегарев В.Ф. (ГЕОХИ РАН)
 lukanin@geokhi.ru тел.: (095)137-44-72 факс: (095)938-20-54

Ключевые слова: магматический флюид, гранит, дегазация магм, хлор, вода, цинк, свинец

Отделение магматических флюидов от гранитных магм при их подъеме к поверхности и кристаллизации один из важных факторов преобразования окружающих пород литосферы и формирования рудообразующих гидротермальных систем, генетически связанных с грантоидным магматизмом. Способность хлора создавать в водных растворах устойчивые комплексы с Zn, Pb, Cu, Sn и некоторыми другими рудными и редкими элементами определяет его исключительно важную роль в извлечении этих элементов из магматического расплава и переносе их высокотемпературными флюидами. В данном сообщении представлены результаты численного моделирования поведения Zn и Pb при дегазации гранитных магм, содержащих H₂O и Cl, которые позволяют количественно оценить возможные масштабы выноса Zn и Pb в процессе дегазации магм в зависимости от (1) давления, при котором достигается насыщение расплавов летучими компонентами, (2) степени кристаллизации расплава, а также (3) динамики удаления флюидной фазы из магматической системы. Используемая компьютерная модель основана на обобщении имеющихся экспериментальных данных и учитывает: (а) зависимость коэффициентов распределения Cl, Zn и Pb между флюидной фазой и расплавом от давления и концентрации Cl в системе, (б) возможность гетерогенизации флюидной фазы с образованием существенно водной флюидной фазы (aq) и хлоридной солевой жидкости (lq) в широком диапазоне РТХ условий [1-3]. Расчеты по распределению Cl, H₂O, а также Zn и Pb между расплавной, кристаллической и флюидной фазами в процессе дегазации проводились для систем с разной степенью открытости в отношении флюидной фазы, выделяющейся из расплава.

Изменение состава флюидной фазы при подъеме магматического расплава в ходе *декомпрессионной дегазации* в условиях близких к изотермическим имеет общую тенденцию независимо от глубины начала дегазации и степени открытости системы. Первые самые глубинные порции образующейся флюидной фазы имеют наиболее высокие концентрации хлора, а также Zn и Pb. Например, при подъеме расплавов с исходными содержаниями 0,2 мас.% Cl, 5,5-7,5 мас.% H₂O и по 100 ppm Zn и Pb, дегазация которых начинается на глубинах, соответствующих 2-3 кбар, концентрации хлора в первых порциях флюида достигают 4-6 т, а концентрации Zn и Pb соответственно 1200-1500 и 400-900 ppm. С понижением давления концентрация Cl и металлов во флюиде уменьшаются. Концентрации этих элементов снижаются значительно более резко, если дегазация протекает в открытой системе, когда флюид удаляется из системы по мере своего образования. Балансовых расчеты показывают, что в условиях открытой системы на первых глубинных этапах декомпрессионной дегазации из магмы извлекается наибольшее количество рудных элементов. Иллюстрацией может служить случай декомпрессионной дегазации, показанный на рис.1, когда дегазация расплава во время подъема начинается при 3 кбар.

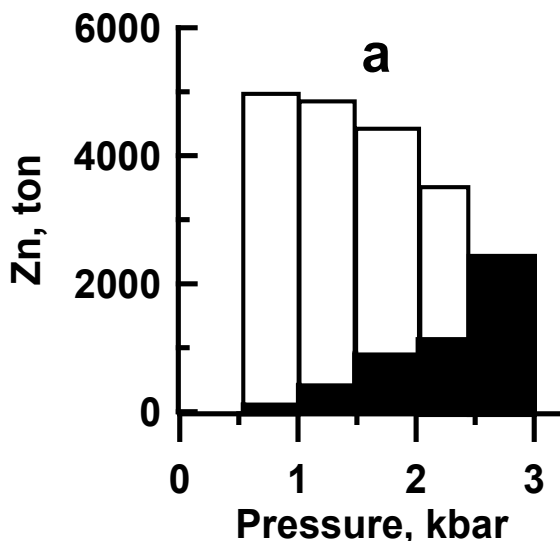
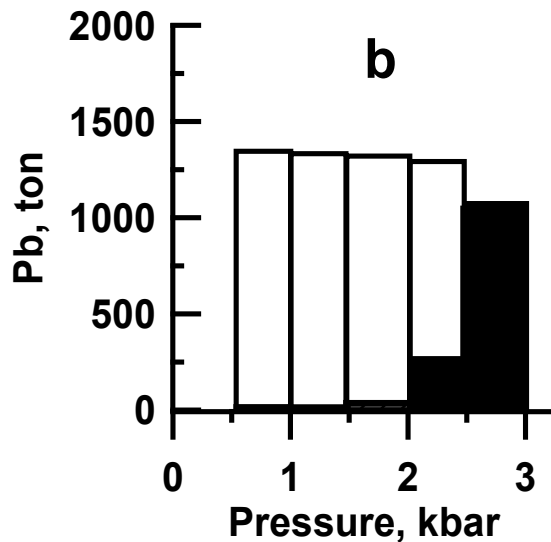


Рис.1. Количества Zn (а) и Pb (б), извлекаемые флюидной фазой при декомпрессионной дегазации гранитного расплава в открытых условиях. Приведены результаты моделирования для расплава массой $2,3 \times 10^9$ тонн (объем 10^6 м³), с исходными концентрациями: 0,2 мас.% Cl, 7,5 мас.% H₂O и по 100 ppm Zn и Pb. Залитые столбики - количество металла, выделившегося вместе с флюидом в данном интервале давлений, равном ~ 0,5 кбар. Пустые столбики - суммарное количество металла, выделившегося на данном этапе подъема расплава.



Из рис.1а следует, что количество Zn, экстрагируемого флюидом из расплава на первых этапах дегазации при снижении давления от 3 до 2,5 кбар, составляет > 45 % от всей массы цинка, которая может быть извлечена флюидной фазой при дегазации магмы при ее подъеме в интервале от 3 до 0,5 кбар. Аналогичные расчеты для свинца (рис.1б) показывают, что доля извлечения Pb на первых этапах дегазации в интервале 3-2,5 кбар еще выше и достигает более 70%. Для расплавов, имеющих изначально одинаковые концентрации воды и рудных элементов, степень извлечения металлов тем выше, чем выше в них концентрация Cl и соответственно соотношение Cl/H₂O.

Характер изменения концентраций Cl, Zn и Pb во флюиде в ходе кристаллизационной дегазации в изобарических условиях существенно зависит от давления, при котором идет кристаллизация, валового коэффициента распределения металлов между кристаллами и расплавом $D(\text{Me})/m$, степени открытости системы. Дегазация насыщенного флюидом расплава в процессе кристаллизации при высоких давлениях ($\geq 1,5$ -2 кбар) сопровождается снижением концентраций Cl, Zn и Pb. Особенно резкое снижение происходит в открытых условиях. Чем выше $D(\text{Me})/m$, тем быстрее в процессе дегазации уменьшается концентрация рудного элемента во флюиде. Как и в случае декомпрессионной дегазации, большая часть рудного компонента, выносимого из системы флюидной фазой в процессе кристаллизационной дегазации, извлекается на первых ее этапах. Рис.2 демонстрирует случай дегазации при 2 кбар расплава гранитного состава с исходными концентрациями 0,2 мас.% Cl, 5,8% H₂O и 100 ppm рудного элемента. Вместе с флюидной фазой, выделяющейся из магмы при образовании первых 20 % кристаллов, выносится ~ 50% Zn и более 75% Pb от того суммарного количества металла, которое флюид способен извлечь из магмы при практически полной ее раскристаллизации (>90%).

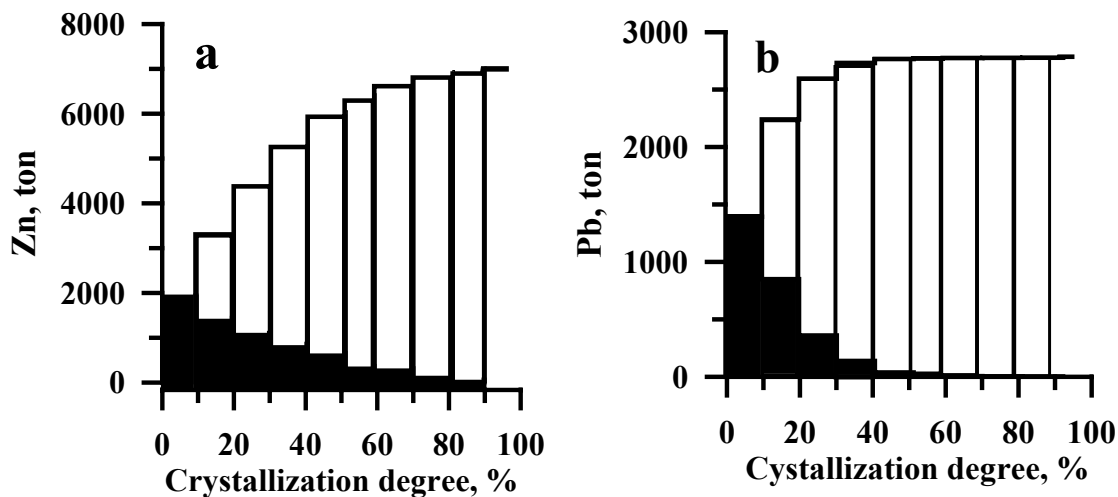


Рис.2. Количества Zn (а) и Pb (б), извлекаемые флюидной фазой при кристаллизационной дегазации гранитного расплава в открытых условиях при давлении 2 кбар. Приведены результаты моделирования для расплава массой $2,3 \times 10^9$ тонн (объем 10^6 м^3) с исходными концентрациями: 0,2 мас.% Cl, 5,8 мас.% H₂O и по 100 ppm Zn и Pb. Коэффициенты распределения металлов кристаллы/расплав постоянны $D(\text{Zn})/m = 0,6$ и $D(\text{Pb})/m = 0,7$. Залитые столбики - количество металла, выделившегося вместе с флюидом в данном интервале кристаллизации, равном ~ 10 %. Пустые столбики - суммарное количество металла, выделившегося на данном этапе кристаллизации.

Если кристаллизационная дегазация насыщенных флюидом расплавов происходит на относительно малых глубинах при давлениях ≤ 1 кбар, характер поведения рудных компонентов в процессе дегазации существенно меняется по сравнению с высокими давлениями. Концентра-

ции хлора и рудных элементов во флюиде в ходе кристаллизации возрастают, как в закрытых, так и открытых условиях. В связи с этим и степень извлечения рудных элементов в процессе кристаллизации возрастает с каждой последующей порцией флюида, отделяющейся от магмы. Повышение концентрации хлора во флюидной фазе может привести на определенной стадии кристаллизации к образованию гетерогенного флюида (aq+lq). Коэффициенты распределения Zn и Pb между хлоридной жидкостью (lq) и кислым силикатным расплавом $D(\text{Me})lq/m$ почти на порядок выше, чем коэффициенты распределения этих элементов между водным флюидом (aq), равновесным с lq, и расплавом того же состава $D(\text{Me})aq/m$. Поэтому при дегазации в условиях открытой системы с появлением lq концентрация этих элементов во флюидной фазе и, соответственно, степень их экстракции резко возрастают. Однако при дальнейшей кристаллизации в открытых условиях концентрация рудных элементов во флюиде уже не растет, а наоборот слегка уменьшается. При этом экстракция металлов на каждом последующем этапе кристаллизации также остается примерно на постоянном уровне или даже слегка уменьшается. В качестве примера, на рис 3 показано как меняется количество экстрагируемого на разных этапах кристаллизации гранитного расплава при 0,6 кбар в открытых условиях, т.е. когда флюидная фаза полностью удаляется из системы по мере своего образования. После кристаллизации примерно 50% расплава флюидная фаза становится гетерогенной. При появлении высокохлоридной фазы степень извлечения цинка скачкообразно возрастает. Но в дальнейшем степень его извлечения флюидной фазой на каждом последующем шаге кристаллизации остается примерно постоянной.

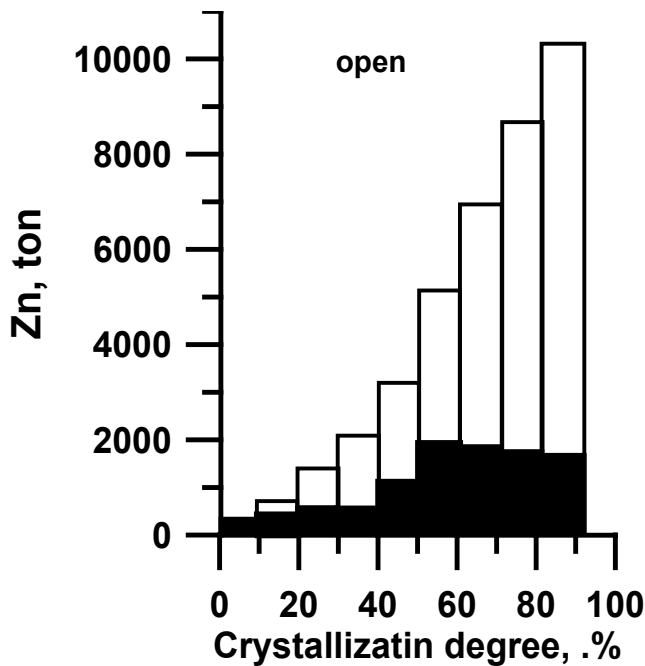


Рис.3. Количество Zn, извлекаемого флюидной фазой при кристаллизационной дегазации гранитного расплава в открытых условиях при 0,6 кбар. Расплав массой $2,3 \times 10^9$ тонн с исходными концентрациями 0,15 мас.% Cl, 2,9 мас.% H_2O и 100 ppm Zn. При расчетах принято $D(\text{Zn})s/m = 0,6$ и $D(\text{Zn})lq/aq = 10$. Остальные обозначения те же, что и на рис.2.

Таким образом, анализируя процессы дегазации гранитных магм, можно выделить две наиболее благоприятные обстановки для формирования магматических флюидов с высокими концентрациями хлора и рудных элементов, которые способны извлекать из гранитных магм значительные количества металлов. Во-первых, это начальные этапы дегазации расплавов при их подъеме или кристаллизации на больших глубинах ($\geq 1,5-2$ кбар). Во-вторых, кристаллизация магм в приповерхностных магматических камерах (≤ 1 кбар), которая может сопровождаться образованием высоко-хлоридных солевых жидкостей. Результаты численного моделирования демонстрируют максимальные количества рудных элементов, которые могут быть извлечены из магм в процессе их дегазации. Они подтверждают сделанное ранее общее заключение о том, что количества металлов, выносимых флюидной фазой из гранитных интрузий, имеющих кларковые концентрации Zn и Pb, могут быть вполне достаточными для образования в последующем крупных месторождений [4, 5 и др.]. Вместе с тем необходимо отметить, что количество выносимых рудных элементов существенным образом зависит от двух факторов: во-первых, от концентрации летучих компонентов (для таких элементов как Zn и Pb в первую очередь от концентрации хлора) и, во-вторых, от конкретного механизма отделения флюидной фазы от магмы на разных этапах ее дегазации. В целом можно сделать вывод, что «геохимическая специализация» магм, способ-

ность их быть источником рудных компонентов при образовании крупных месторождений определяется не столько исходной концентрацией рудных элементов, сколько исходным содержанием летучих компонентов, а также динамикой выделения флюидной фазы в ходе дегазации магм при их подъеме к поверхности и кристаллизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 00-05-64639), а также ОНЗ РАН (проект № 10-5, 2003 г.).

Литература

1. *Lukanin O.A.* Degassing of Cl- and H₂O-bearing acid magmas at their ascent to the surface and crystallization. *Experiment in Geosciences*, 1999, v. 8, N 2. p. 38-40.
2. *Луканин О.А., Дернов-Пегарев В.Ф.* Поведение Zn и Pb при дегазации гранитных магм, содержащих воду и хлор (результаты компьютерного моделирования). XIV Российское совещание по экспериментальной минералогии, 2-4 окт. 2001 г. Черноголовка. Тезисы докладов. С. 55.
3. *Луканин О.А., Дернов-Пегарев В.Ф.* Дегазация водосодержащих гранитных магм: поведение хлора и некоторых рудных элементов (Zn, Pb) при формировании магматогенных флюидных фаз. В сб. Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ. Материалы Международной конференции памяти ак. П.Н. Кропоткина, 20-24 мая 2002 г. г. Москва. М.: ГЕОС. 2002, с. 186-188.
4. *Рябчиков И.Д.* Термодинамика флюидной фазы гранитоидных магм. М.: Наука, 1975. 232 с.
5. *Hedenquist J.W., Lowenstern J.B.* The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 1994, v. 370, (18 August), p. 519-527.

Вестник Отделения наук о Земле РАН - №1(21) 2003

Информационный бюллетень Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии 2003 года (ЕСЭМПГ-2003)

URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2003/informbul-1/magm-33.pdf

Опубликовано 15 июля 2003 г.

© Отделение наук о Земле РАН, 1997 (год основания), 2003

При полном или частичном использовании материалов публикаций журнала, ссылка на "Вестник Отделения наук о Земле РАН" обязательна