

## РОЛЬ ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ЖИЛЬНОГО ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ

**Борисов М.В., Шваров Ю.В.**

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (МГУ), Москва, [borisov@geol.msu.ru](mailto:borisov@geol.msu.ru)

Цель настоящей работы – оценка влияния величины градиента давления в термобарогradientных системах на эффективность процессов жильного гидротермального рудообразования методами термодинамического моделирования.

Эталонными объектами являются жильные полиметаллические месторождения Садонского рудного района (Сев.Осетия), по которым накоплена представительная база геохимических данных и результатов термодинамического моделирования. Рудообразование на месторождениях района происходило в предкелловейское время ( $J_2$ ), а вероятным источником рудных компонентов являлись граниты ( $PZ_3$ ), которые вмещают основную часть рудных жил наиболее продуктивных месторождений (Садон, Архон, Згид и др.). Такой вывод сделан на основании данных по изотопному составу свинца в галенитах руд и в калиевых полевых шпатах вмещающих пород района [Тугаринов и др., 1975]. Подтверждение получено нами при исследовании закономерностей распределения рудных элементов в первичных ореолах и РЗЭ в рудах, а также по результатам термодинамического моделирования процессов рудообразования [Борисов, 2000; Borisov, 2003; Борисов и др., 2006, 2022]. При моделировании чаще всего именно граниты рассматривались как основной рудогенерирующий субстрат.

Для рассматриваемых месторождений нами предложена генетическая модель гидротермальной системы [Борисов, 2000; Borisov, 2003; Борисов и др., 2006, 2022]. Основные её положения сводятся к следующему. В пределах Садоно-Унальского глубинного сброса, который ограничивает с юга область распространения месторождений, в дорудное время происходила циркуляция углекисло-хлоридных вод. Внедрение в  $J_2$  даек и штоков субвулканических и гипабиссальных пород и интенсивные тектонические подвижки инициировали гидротермальный процесс: интрузии создали необходимый источник тепла, закладывались рудоконтролирующие трещины, образовались зоны механических деформаций пород. Нагретые растворы из глубинного сброса фильтровались через зоны дробления в палеозойских гранитах и вступали в реакцию с ними. Формировались области мобилизации различных компонентов из вмещающих пород (Zn, Pb, Cu, Fe, S(II) и др.). Рудоносные растворы из областей мобилизации двигались

вверх по рудоконтролирующим трещинам. Постепенное охлаждение растворов за счет обмена теплом с вмещающими породами и локальной гетерогенизации приводило к формированию рудных жил выполнения и околожильных ореолов. Такая геологическая модель лежит в основе моделирования жильного рудообразования.

Проведены расчеты и исследованы модели в системе H-O-K-Na-Ca-Mg-Al-Si-Fe-C-Cl-S-Zn-Pb-Cu (пакет программ HCh [Шваров, 2008]). В большинстве исследованных ранее моделей заложено постепенное снижение температуры (при постоянном давлении) в рудоконтролирующих структурах. Такое снижение является основным фактором отложения рудного вещества и обосновано данными по включениям на эталонных месторождениях: градиенты температуры до 35-50°C и давления до 100-200 бар на 100 м по восстанию [Ляхов и др., 1994]. Эффект понижения давления в ряде моделей нами ранее изучался [Борисов, 2000; Borisov, 2003] и было показано, что он значительно меньше, чем падение температуры. Было решено уточнить эти данные.

Расчеты сделаны для четырех вариантов моделей, в которых в области жильного рудообразования снижаются температура и давление. Структура моделей: **область мобилизации** – гранит реагирует с безрудным раствором (1 т NaCl, 0.5 т H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 1 кг H<sub>2</sub>O) при 420°C и 1 кбар (50 волн раствора); **область жильного рудообразования** – 31 последовательные проточные реакторы при понижении температуры от 400 до 100°C (шаг 10°C по реакторам), но по давлению рассмотрены четыре варианта (давление постоянное - 1000 бар; снижается с шагом 10 бар по реакторам, т.е. до 690 бар при 100°C; снижение с шагом 20 бар по реакторам, т.е. до 380 бар при 100°C, снижение с шагом 30 бар по реакторам, т.е. до 70 бар при 100°C). Результаты для этих моделей показаны на рисунке для одного из уровней по восстанию модельной жилы, отвечающему 200°C.

Эффект падения давления практически мало заметен. Так на рисунке видим (от шага по давлению 0 бар к шагу 30 бар): количество пирита растет – в максимуме отложения от 5.3e-4 моля до 6.4e-4 моля, т.е. на 20%, а количества сфалерита уменьшается – в максимуме отложения от 4.2e-4 моля до 3.7e-4 моля, т.е. на 12%. Однако, такая тенденция (от шага 0 бар к шагу 30 бар) меняются выше и ниже этого уровня по восстанию модельной жилы. Так при температурах ниже 200°C отложение пирита и сфалерита увеличивается, а при температурах 200°C и выше только уменьшается.

Таким образом, можно считать установленным, что при понижении давления (с шагом по реакторам 10-30 бар) происходит

некоторое перераспределение в отложении сульфидов: при высоких температурах отложение уменьшается, а при низких – увеличивается.

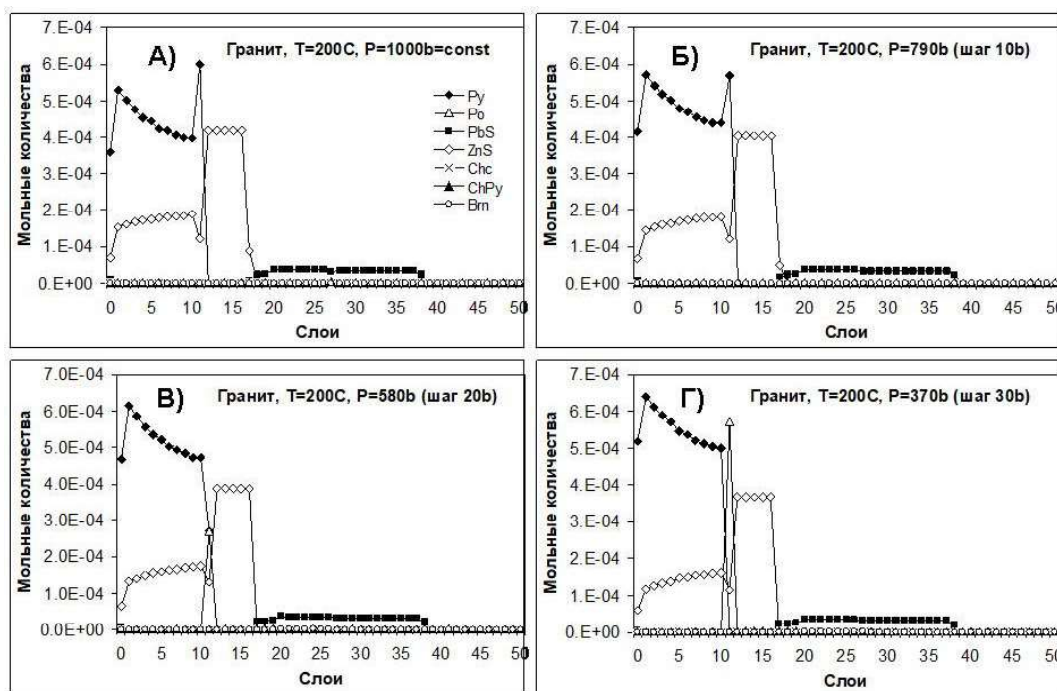


Рис. Отложение сульфидов в модельных жилах при 200°C после прохождения 50 волн рудоносного раствора из области мобилизации, которые создают 50 последовательных слоев. А) постоянное давление равное 1000 бар; Б), В), Г) – шаг по давлению 10, 20, 30 бар. Минералы: Py - пирит, Po - пирротин, ZnS - сфалерит, PbS - галенит, Chc - халькозин, ChPy - халькопирит, Bm - борнит (кварц не показан – около 5e-4 моля в каждом слое).

Эти эффекты невелики для сфалерита и галенита (порядка 10-15%), но могут быть значительными для пирита (более 45% при 150°C) и пирротина. В целом снижение давления по реакторам, описывающим жилу по восстанию, приводит к незначительному снижению общей продуктивности работы гидротермальной системы по отношению отложения рудных компонентов. Так при постоянном давлении отлагается 90.15% цинка, извлеченного из гранита в зоне мобилизации, а при шаге по давлению в 30 бар – 88.83%.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №20-05-00098).

## Литература

1. Борисов М.В. Геохимические и термодинамические модели жильного гидротермального рудообразования. М.: Научный мир. 2000.

2. Борисов М.В., Бычков Д.А., Шваров Ю.В. Геохимические структуры полиметаллических жил выполнения и параметры гидротермального рудообразования // Геохимия. 2006. №11. С. 1218-1239.
3. Борисов М.В., Бычков Д.А., Шваров Ю.В., Лубкова Т.Н. Процессы гидротермального жильного свинцово-цинкового рудообразования: геохимические данные и термодинамические модели // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 3. С. 26–36.
4. Ляхов Ю.В., Поздеев К.М. и др. Термобарогеохимическая модель рудной зональности и оценка перспектив Садонского свинцово-цинкового района// Руды и металлы. 1994. № 2. С. 45-54.
5. Тугаринов А.И., Бибикова Е.В. и др. Применение свинцово-изотопного метода исследования для решения вопросов о генезисе свинцовых месторождений Северо-Кавказской рудной провинции // Геохимия. 1975. № 8. С. 1156-1163.
6. Шваров Ю.В. HCh: новые возможности термодинамического моделирования геохимических процессов, предоставляемые Windows // Геохимия. 2008. № 8. С. 898–903.
7. Borisov M.V. Geochemical and thermodynamic models for the genesis of low- and medium-temperature vein mineralization and metasomatism in the wall rocks // Geochemistry International. 2003. Vol. 41. Suppl. 2. PP. S145-S312.

## THE ROLE OF PRESSURE GRADIENT IN THE PROCESSES OF VEIN POLYMETALLIC ORE FORMATION

**Borisov M.V., Shvarov Yu.V.**

Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow,  
[borisov@geol.msu.ru](mailto:borisov@geol.msu.ru)

Thermodynamic modeling of vein Pb-Zn ore formation in a temperature-bar gradient system has been performed. Models with a constant temperature gradient along the rise of a model vein (31 reactors, 10°C step in the temperature range from 400 to 100°C) but with a variable pressure gradient of 0, 10, 20 and 30 bar per 10°C (from 1000 bar in the mobilization area to 1000, 690, 380 and 70 bar at 100°C) have been investigated. It has been established that with a decrease in pressure (with a step of 10-30 bar in reactors) some redistribution in sulfide deposition occurs: at high temperatures, deposition decreases, and at low temperatures, it increases. In general, a decrease in pressure in reactors describing a vein along the rise leads to an insignificant decrease in the overall productivity of the hydrothermal system in relation to the deposition of ore components.