

**Первые данные об изотопном составе меди и серы  
в минералах из руд Удоканского месторождения медистых песчаников  
(Забайкалье)**

Крупнейшее в Евразии Удоканское месторождение медистых песчаников расположено в Забайкальском крае, в центральной части Кодаро-Удоканской структурно-формационной зоны среди карбонатно-терригенных метаморфизованных отложений нижнего протерозоя. Группы согласных линзообразных рудных тел тяготеют к четырем рудоносным уровням. Меденосные осадки представлены комплексом фаций подводной дельты, чередующихся с заливно-лагунными и прибрежно-морскими фациями. Сульфидные руды преимущественно слоистые, вкрапленные и гнездово-вкрапленные, борнит-халькозиновые, реже встречаются линзы пирит-халькопиритового состава. Развитые локально прожилковые руды приурочены к разломам и контакту с дайкой габбро. Зона окисления достигает глубины более 300 м от поверхности. Распространение окисленных руд на глубину контролируется разломами и зонами трещиноватости [Чечеткин и др., 1995].

На генезис Удоканского месторождения существует несколько точек зрения [Чечеткин и др., 1995]. На основании распространения в районе изверженных пород, которые прорывают и метаморфизируют меденосные отложения, присутствия «гидротермальных» минералов и жил И. П. Резников, Ф. И. Вольфсон и В. В. Архангельская считали, что руды месторождения имеют гидротермально-метаморфогенное происхождение. А. В. Сочава предполагал, что медь была привнесена грунтовыми водами из глубинных или экзогенных источников. П. П. Петровский обосновал метасоматическую модель рудообразования и генетическую связь с Чинейским массивом габбро на основании зонального размещения медных проявлений и тектономагматической активности региона. Э. Г. Конников предложил гидротермально-метасоматический механизм образования руд в связи с гипотетическим погребенным базитовым масси-

вом. Б. И. Гонгальский рассматривает проявления меди в магматических (Чинейское) и осадочных (Удоканское) породах как генетически родственные на основании взаимоотношений Чинейского плутона с вмещающими толщами и моделирования фракционной кристаллизации базитовых расплавов. Источником меди в обоих случаях мог быть располагающийся на небольшой глубине базит-гипербазитовый массив. Однако большинство исследователей, детально изучавших Удоканское месторождение, придерживаются первично-осадочной гипотезы его образования с седиментационно-диагенетическим формированием основных руд и признаками регионального и контактового метаморфизма (Н. Н. Бакун, Ю. В. Богданов, Р. Н. Володин, Э. Ф. Гринвальд, Ф. П. Кренделев, Л. Ф. Наркелюн, А. И. Трубачев, В. С. Четкин и др.).

В предлагаемой работе источник вещества при формировании Удоканского месторождения оценивается с помощью изотопный состав меди.

В природе существует два стабильных изотопа  $^{63}\text{Cu}$  и  $^{65}\text{Cu}$  с распространенностью 69.1 и 30.9 ат. %, соответственно. Величина, характеризующая отклонения изотопного состава образца от международного стандарта (NIST 976, 0.4456) вычисляется по формуле:  $\delta^{65}\text{Cu} = ((^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}_{\text{образец}}) / (^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}_{\text{стандарт}}) - 1) \times 1000$ .

Первые попытки оценки изотопных соотношений меди в природных объектах проводились с использованием термо-ионизационных масс-спектрометров (TIMS) [Walker et al., 1958; Shields et al., 1965] и не давали достаточной точности и воспроизводимости из-за неполного перехода меди в плазму [Shields et al., 1965]. К концу XX столетия количественное определение изотопов ряда металлов, включая медь, стало возможно благодаря внедрению мультиколлекторных масс-спектрометров с индуктивно-связанной плазмой (MC-ISP-MS).

В ранних работах показано, что  $\delta^{65}\text{Cu}$  в магматических породах варьирует в пределах  $-0.4...+0.5$  ‰ [Magéchal, 1998], а в халькопирите магматогенных месторождений – от  $-0.10$  до  $-0.20$ , что расценивается как свидетельство изотопной однородности источника [Zhu et al., 2000; Larsen et al., 2003]. Для сульфидов гидротермальных месторождений характерны более широкие вариации  $\delta^{65}\text{Cu}$  [Larsen et al., 2003; Maher et al., 2003; Mason et al., 2005 и др.], связанные с многократной ремобилизацией меди в ходе гидротермальных процессов. Значения  $\delta^{65}\text{Cu}$  халькопирита из активных труб современных «черных курильщиков» отличаются от такового из более древних построек, что позволило предположить возможность изотопного обмена между отложившимися сульфидами и раствором [Zhu et al., 2000].

Наиболее широкие вариации  $\delta^{65}\text{Cu}$  связывают с гипергенезом и сопровождающими его окислительно-восстановительными реакциями [Larsen et al., 2003 и др.]. Более того, возможность «облегчения» меди в реликтовых сульфидах из окисленных руд, по сравнению с первичными, была установлена на примере гидротермальных жил Шварцвальда [Markl et al., 2006].

Картина распределения изотопов меди может усложняться также влиянием бактерий, сорбционных процессов и другими факторами. Экспериментально доказано, что в абиогенных условиях изотопные соотношения меди в растворе соответствуют таковым в растворяемом сульфиде, а в присутствии *Thiobacillus ferrooxidans* медь в растворе более легкая, а тяжелый изотоп концентрируется в аморфных гидроксидов, образующих оболочки вокруг бактериальных клеток [Mathur et al., 2005].

Таким образом, однозначно судить об источнике вещества, опираясь только на изотопный состав меди, нельзя. Традиционно для этой цели используют изотопный состав серы. Разделение изотопов серы в геологических процессах происходит, главным образом, в результате равновесного термодинамического (реакции изотопного фракционирования при высоких температурах, в результате которых сера сульфатов всегда тяжелее серы сульфидов) и кинетического изотопного эффектов (направленные химические реакции при нормальных температурах). Процессы биогенной сульфат-редукции приводят к наиболее значительному изотопному облегчению серы [Фор, 1989].

Т а б л и ц а

**Изотопный состав меди и серы в минералах руд Удоканского месторождения**

№ п/п	Способ отбора	Минерал	$\delta^{65}\text{Cu} \text{‰}$ , NBS	$\delta^{34}\text{S} \text{‰}$ , CDT
1	1	сру	-6.00	-8.9
2	1	сс	-0.32	-19.8
3	1	сс	-0.04	-4.2
4	1	brn	-3.30	-10.96
5	1	сру	-2.31	-12.3
6	2	bn-сс	0.82	-4.6
7	2	сру	-1.02	-14.2
8	2	сс-bn	0.40	-16.6
9	2	bn-сс	-0.34	-10.0
10	2	bn-сс	-1.33	-23.9
11	2	сру	1.86	-21.3
12	2	сс-bn	-0.61	2.0
13	1	ant	-0.70	+1.7
14	1	brn	0.90	+3.8
15	1	ma	-0.36	Н.о.
16	1	ma	-1.06	Н.о.
17	1	ant	0.98	-7.3
18	1	brn	1.73	-1.8
19	1	ant	1.12	-0.05
20	1	сс	1.46	-8.9
21	1	ma	-0.56	Н.о.
22	1	brn	-0.27	Н.о.
23	1	brn	-0.27	+1.7

П р и м е ч а н и е . 1 – штучной образец, 2 – концентрат усредненной пробы. Минералы: сс – халькозин, сру – халькопирит, bn – борнит, ant – антлерит, brn – брошантит, ma – малахит. Н.о. – не определялось. Все сульфиды штучных образцов, за исключением ан. 3, отобраны из прослоев, согласных с напластованием пород.  $\delta^{65}\text{Cu}$  определены в Джуниата колледже Р. Матуром, ошибка измерений  $\sim 0.06 \text{‰}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  – в Институте минералогии С. А. Садыковым, ошибка измерений  $0.35 \text{‰}$ .

Полученные нами первые данные об изотопном составе меди Удоканского месторождения показывают его значительные вариации как в выборке сульфидов, так и кислородных солей меди при общей тенденции утяжеления меди в последних (табл.).

Обращает на себя аномально низкое значение  $\delta^{65}\text{Cu}$  халькопирита (ан. 1, табл.). Значения  $\delta^{34}\text{S}$  для всех образцов, за исключением ан. 9, отрицательные с большим разбросом. И медь, и сера в кислородных солях преимущественно более тяжелая, чем в сульфидах. Четкой корреляции между  $\delta^{65}\text{Cu}$  и  $\delta^{34}\text{S}$  нет.

Легкий изотопный состав серы сульфидов позволяет связать их образование с деятельностью сульфат-редуцирующих бактерий, а значительные вариации  $\delta^{65}\text{Cu}$  указывают на неоднократные процессы ремобилизации меди с варьирующими значениями Eh–pH среды, что соответствует гипотезе первично-осадочного накопления металла с последующей концентрацией и перераспределением при диагенезе и метаморфизме.

*Авторы благодарят ОАО «Байкальская горная компания» за возможность работы на месторождении.*

## Литература

- Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.
- Четкин В. С., Володин Р. Н., Наркелю Л. Ф. и др. Удоканское месторождение медистых песчаников // В кн.: Месторождения Забайкалья М: Геоинформмарк, 1995. Т. 1.
- Larson P., Maher K., Ramos F.C. et al. Copper isotope ratios in magmatic and hydrothermal ore-forming processes // Chemical Geology. 2003. Vol. 201. P. 337–350.
- Maréchal C., Telouk P., Albarède F. Precise analysis of copper and zinc isotopic compositions by plasma-source mass spectrometry // Chemical Geology. 1999. Vol. 156. P. 251–273.
- Markl G., Lahaye Y., Schwinn G. Copper isotopes as monitors of redox processes in hydrothermal mineralization // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2006. Vol. 70. P. 4215–4228.
- Maher K., Ramos F., Larson P. Copper isotope characteristics of the Cu (+Au, Ag) skarn at Corocochuayco, Peru // Geological Society of America, Annual Meeting, 2003. Paper 211–4.
- Mason T. F. D., Weiss D. J., Chapman J. B. et al. Zn and Cu isotopic variability in the Alexandrinka volcanic-hosted massive sulphide (VHMS) ore deposit, Urals, Russia // Chemical Geology. 2005. Vol. 221. P. 170–187.
- Mathur R., Ruiz J., Titley S. et al. Cu isotopic fractionation in the supergene environment with and without bacteria // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2005. Vol. 69. P. 55233–5246.
- Zhu X.K., O’Nions R.K., Gu Y. et al. Determination of natural Cu-isotope variation by plasma-source mass spectrometry: implications for use as geochemical tracers // Chemical Geology. 2000. Vol. 163. P. 139–149.