

## Часть 2. МЕТАЛЛОГЕНИЯ ОКЕАНОВ

*В. В. Масленников<sup>1</sup>, Р. Р. Ларж<sup>2</sup>, С. П. Масленникова<sup>1</sup>, Н. С. Архиреева<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> – *Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс  
mas@mineralogy.ru*

<sup>2</sup> – *Университет Тасмании, центр CODES*

### **Типохимизм пирита и пирротина как отражение эволюции золотоносности углеродистых отложений в окраинно-океанических структурах**

В последние годы сотрудниками Института минералогии УрО РАН и Международного центра по изучению рудных месторождений (CODES, Университет Тасмании) проводятся совместные исследования эволюции элементов-примесей в последовательно формирующихся разновидностях пирита золоторудных и колчеданных месторождений. Эти исследования направлены на решение проблемы источников золота в золоторудных месторождениях, относящихся, главным образом, к карлинскому или суходожскому типам. Результатам изучения месторождений черносланцевых формаций посвящено огромное количество публикаций. Гораздо меньше известно о поведении золота и других элементов-примесей в рудоконтролирующих черносланцевых горизонтах колчеданных месторождений.

Несмотря на значительный прогресс в создании генетических моделей золоторудных месторождений, приуроченных черносланцевым формациям, остается еще много нерешенных вопросов [Large et al., 2011]. В настоящее время доминируют три позиции в модели золотонакопления: 1) богатые золотом флюиды формировались при глубинном метаморфизме или поступали из коровых гранитов или из мантии; 2) богатые органическим веществом осадочные породы являются ловушками, осаждающими золото из гидротермальных флюидов; 3) золото привносится позже – в синтетектоническую или посттектоническую стадии.

Еще в 1866 г. Р. Дантри [Dantree, 1866] высказал идею о поступлении золота из органического вещества осадочных пород. Впоследствии некоторые исследователи предположили, что золото освобождается из богатых органическим веществом и диагенетическим пиритом черных сланцев во время диагенеза и метаморфизма [Буряк, 1982]. Нами получены дополнительные доказательства в пользу этой модели [Large et al., 2007; 2009; 2011; Meffre et al., 2008; Thomas et al., 2011]. Основными объектами исследований являлись золоторудные месторождения-гиганты, такие как Сухой Лог (Россия), Кумтор (Казахстан), Карлин (США), Бендиго (Австралия), а также Сафьяновское (Урал) и Артемьевское (Рудный Алтай) колчеданные месторождения. Для сравнения были привлечены пиритовые конкреции безрудных вулканогенно-осадочных и осадочных черносланцевых комплексов. Поставленная задача решалась на основе парагенетического анализа минеральных ассоциаций с последующим анализом элементов-примесей методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС) [Large et al., 2007, 2009].

Цель данной статьи – акцентировать внимание на главных этапах мультистадийной модели, полученной нами в результате многолетней (2006–2012 гг.) работы:

1) золото поступает в осадочный бассейн с реками и экстрагируется бактериями или абсорбируется органическим веществом, глинами и сульфидами железа; 2) богатые органикой металлоносные осадки – отличный источник Au и других элементов (As, Zn, V, Mo, Ag, Ni, Se, Te) по сравнению с магматическими породами; 3) золото концентрируется в поровых флюидах уже на стадиях диагенеза и катагенеза или раннего метаморфизма, а затем переотлагается локально в синтетектоническую стадию. В золоторудных месторождениях, залегающих в черносланцевых формациях, золото может быть растворено в раннем мышьяковистом пирите или арсенопирите, а также представлено в виде крупных включений и прожилков самородного золота и теллуридов в метаморфогенно-гидротермальном пирите. Золото концентрировалось в широком диапазоне преобразований органических илов от стадии диагенеза до стадии раннего (зеленосланцевого) метаморфизма. Месторождения, испытавшие метаморфизм амфиболитовой и гранулитовой фации, показывают черты пострудного преобразования [Large et al., 2011].

В целом, валовые содержания Au, As и других элементов-примесей в углеродистых отложениях нельзя назвать слишком высокими, хотя их содержания существенно превосходят кларки магматических пород [Large et al., 2011]. Наиболее убедительные данные, включающие 9000 анализов, представлены М. П. Кетрис и Я. Э. Юдовичем (Ketris, Yudovich, 2009). Они подразделили черные сланцы на две группы: 1) фоновую – с содержаниями Au 3–20 мг/т и аномальную – с содержаниями Au 35–50 мг/т. Появление группы черных сланцев с аномальными содержаниями золота не объяснено. Содержания Au, определенные нами в органическом веществе вмещающих углеродистых алевропелитов золоторудного месторождения провинции Карлин, составляют 4.6 г/т, что значительно выше, чем в черных сланцах в целом. Содержания ряда других элементов-примесей в керогене провинции Карлин достигают высоких значений (г/т): As (75000), V (1800), Sb (780), Mo (690), U (425) и Ni (380). В целом, полученные данные согласуются с опубликованными ранее, за исключением некоторых определений, по которым содержания Au в керогене достигают 15–46 г/т [см. обзор в Large et al., 2011]. Положительная корреляция между Au и V, а также между упомянутыми элементами-примесями, чувствительными к изменениям окислительно-восстановительного потенциала, является хорошим индикатором процесса концентрации органических комплексов золота.

Во время диагенеза органических илов, некоторые элементы-примеси, связанные с органическим веществом (As, Au, Mo, Se, Te, Ni, Pb, Cu и Tl), концентрировались в структуре растущего диагенетического пирита. Осадителями золота и других элементов-примесей могли быть исходные моносulfиды железа, окислявшиеся до состояния фрамбоидального пирита. ЛА-ИСП-МС анализ тонкозернистого и фрамбоидального диагенетического пирита, сформированного на нескольких золоторудных месторождениях черносланцевой ассоциации, показывает максимальные содержания элементов-примесей (г/т): As (20400), Au (152), Mo (2700), V (4500), Zn (3400), Cu (4200), Se (4200), Ni (9600), Pb (4100), Co (3100), Sb (1200), Ba (670), Tl (440), Ag (340), Bi (68), Te (68), U (35) W (27). Большинство этих элементов присутствует в структуре пирита, другие (V, Cr, Ba, U и W) связаны с микровключениями оксидов и силикатов в пирите. Наши данные показывают, что содержания золота в диагенетическом пирите золоторудных месторождений обычно находятся в интервале 0.1–12 г/т.

Методом ЛА-ИСП-МС доказано, что существуют корреляции между содержаниями золота и мышьяка в диагенетическом пирите [Large et al., 2009]. На месторож-

дении Сухой Лог, например, маломышьяковистый диагенетический пирит (As 580 г/т) содержит немного Au (0.6 г/т). На этом же месторождении высокомышьяковистый пирит (As 3600 г/т) концентрирует 6 г/т Au. Сингенетическая аккумуляция золотоносного органического вещества и диагенетического пирита в органических илах редко приводит к формированию экономически значимых месторождений. У многих исследователей не оставляет сомнений, что к промышленным концентрациям золота (1–50 г/т) приводят последующие процессы преобразования органического вещества и раннедиагенетического пирита. В стадию позднего диагенеза и катагенеза тонкозернистый золотоносный мышьяковистый пирит может перекристаллизоваться с образованием субгедрального пирита или марказита вокруг конкреций фрамбоидального пирита или в виде мелкозернистого эвгедрального пирита, образующего слои, согласные с общей слоистостью. Уже на этой стадии начинается миграция золота с образованием обособленных включений самородного золота [Large et al., 2007, 2009]. Дальнейшие деформации и сопутствующий метаморфизм сопровождаются перекристаллизацией исходного пирита с образованием крупных кристаллов эвгедрального пирита, содержащих включения самородного золота, халькопирита, сфалерита, галенита и пирротина. Появление последнего, также как и рутила и теллуридов, вероятно, происходит на границе катагенеза и метагенеза. Псевдоморфный пирротин характеризуется минимальными содержаниями Au и других элементов-примесей, по сравнению с исходным пиритом [Thomas et al., 2011]. Фоновые содержания Au и других элементов примесей в более поздних «очищенных» разновидностях пирита обычно на несколько порядков ниже, достигая аномально высоких концентраций при попадании во включения самородного золота или теллуридов. Значительная часть золота концентрируется в раннеметаморфическом арсенопирите, формирование которого следует за процессами пирротинизации. Отложению золота, теллуридов, молибдена, шеелита, арсенопирита, блеклых руд способствует снятие тектонических напряжений с образованием трещин и кливажа, заполняющихся прожилками альпийского типа. В этот же период появляются обильные карбонаты и гематит, свидетельствующие о нарастании окислительных условий минералообразования. Интрузивные магматические массивы, встречающиеся в районе некоторых месторождений, могли быть дополнительным благоприятным фактором, обеспечивающим циркуляцию флюидов, в том числе магматического происхождения.

В представленной модели предполагается, что основное количество золота и мышьяка привносилось реками и сорбировалось на органическом веществе из морской воды окраинно-океанических бассейнов или внутренних эвксинных морей [Large et al., 2011]. В пользу участия морской воды как источника серы свидетельствуют изотопные исследования, указывающие на параллельное изменение изотопного состава серы в пирите и океанической воде в истории Земли [Chang et al., 2008]. Некоторые исследователи предполагают, что для обогащения морской воды и, соответственно, диагенетического пирита Au, As и другими элементами, типичными для золоторудных месторождений, необходимы гидротермальные эксгаляции [Emsbo, 2000]. ЛА-ИСП-МС анализ диагенетического пирита рудокластических черносланцевых горизонтов Сафьяновского и Артемьевского колчеданных месторождений показал, что максимальные содержания Au (6–125 г/т) и других-элементов-примесей колчеданной ассоциации действительно превышают содержания в аналогичном пирите фоновых углеродистых отложений и золоторудных месторождений, сформировавшихся на пассивной окраине континентов. Можно предполагать, что на колчедано-

носных гидротермальных полях часть золота и других элементов-примесей переотлагались в составе конкреций при диагенезе кластогенного пирита.

*Работы проводились в рамках Программы №23 Президиума РАН (проект 12-П5-1003) в соответствии с договором о сотрудничестве между Институтом минералогии УрО РАН и Международным центром по изучению рудных месторождений (CODES, Университет Тасмании).*

### Литература

- Буряк В. А.* Метаморфические процессы и рудообразование. М.: Недра, 1982. 212 с.
- Chang Z., Large R. R., Maslennikov V.* Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: Evidence for an early timing and a seawater sulfur source // *Geology*. 2008. Vol. 36. Is. 12. P. 971–974.
- Dantree R.* Report on geology of the District of Ballan, including remarks on age and origin of Gold // Victorian Geological Survey report. 1866. 11 p.
- Emsbo P.* Gold in Sedex deposits // *Reviews in Economic Geology*, 2000. Vol. 13. P. 427–437.
- Ketris M. P., Yudovich E. Ya.* Estimation of clarks for carbonaceous bioliths: world averages for trace element contents in black shales and coals // *International Journal of Coal Geology*. 2009. Vol. 78. P. 135–148.
- Large R. R., Bull S. W., Maslennikov V. V.* A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits // *Economic Geology*. 2011. Vol. 106. P. 331–358.
- Large R., Danyushevsky L., Hillit H. et al.* Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits // *Economic Geology*. 2009. Vol. 104. P. 635–668.
- Large R., Maslennikov V. V., Robert F. et al.* Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia // *Economic Geology*. 2007. Vol. 102. P. 1233–1267.
- Meffre S., Large R., Scott R. et al.* Age and pyrite Pb isotopic composition of the Giant Sukhoi Log Sediment-hosted gold deposit, Russia // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008. Vol. 72. P. 2377–2391.
- Thomas H. V., Large R. R., Bull S. W. et al.* Pyrite and pyrrhotite textures and composition in sediments, laminated quartz veins, and reefs at Bendigo gold mine, Australia: Insights for ore genesis // *Economic Geology*. 2011. Vol. 106. P. 1–31.

**Г. А. Третьяков**

*Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс  
genatret@yandex.ru*

### **Осадочные породы как источник металлов для гидротермальных систем на дне океана: результаты физико-химического моделирования**

Физико-химическое и экспериментальное моделирование в гидротермальных системах, связанных с осадочными породами, посвящено различным аспектам взаимодействия нагретой морской воды и осадка, обогащенного органическим веществом. Интерес к подобным исследованиям вызван открытием горячих источников, локализованных на осадочных толщах в бассейне Гуаймас, трогах Эсканаба и Окинава, Мидл Вэлли, хр. Хуан де Фука [Gieskes et al., 1988; Goodfellow, Blaise, 1988; Koski