

**Модель формирования месторождений золота в черных сланцах
Артемовского рудного узла (Бодайбинский район)**
(научный руководитель Е. В. Белогуб)

Проблеме генезиса золоторудных месторождений в черносланцевых формациях посвящены исследования ряда отечественных и зарубежных ученых. По современной классификации они принадлежат орогенному типу [Goldfarb et al., 2001]. Классическим примером таких объектов на территории России является Бодайбинский район Ленской золотоносной провинции, для которого разработаны две основные гипотезы формирования месторождений: 1) постмагматически-гидротермальная, согласно которой основной этап концентрации золота в рудах и привнос хотя бы части цветных и благородных металлов отвечает становлению постметаморфических интрузий [Кондратенко, 1977; Distler et al., 2004; Лаверов и др., 2007; Русинов и др., 2008]; 2) метаморфогенно-гидротермальная, по которой рудообразующие растворы генерировались при региональном метаморфизме исходно металлоносных углеродистых толщ [Буряк, 1982; Large et al., 2007; Иконникова и др., 2009; Чугаев и др., 2014].

Месторождения рудного и россыпного золота в Бодайбинском районе объединяются в два крупных рудных узла – Хомолхинский на севере (месторождения Сухой Лог, Голец Высочайший, Вернинское, Невское) и Артемовский на юге (месторождения Копыловское, Кавказ, рудопроявление Красное).

Месторождение Копыловское расположено в 45 км северо-восточнее г. Бодайбо и приурочено к одноименной антиклинали субширотного простирания. Ближайший гранитный массив расположен в 40 км к востоку. Месторождение Кавказ находится в 35 км к северу от г. Бодайбо и приурочено к Васильевской антиклинали и зоне Миллионного разлома субширотного простирания. В строении обоих месторождений участвуют породы догалдынской свиты *Vdg*. Рудопоявление Красное расположено в 75 км к северо-востоку от г. Бодайбо, приурочено к шарниру Рудной антиклинали субширотного простирания и сложено породами аунакитской (*Rau*), вачской (*Rvc*) и анангской (*Van*) свит. Золотоносными являются отложения вачской и, возможно, аунакитской свит. Ближайшие гранитные массивы расположены на расстоянии 30–50 км [Паленова и др., 2015].

Вмещающие породы на месторождениях Копыловское, Кавказ и Красное представлены углеродистыми метапесчаниками, метаалевролитами и сланцами, метаморфизованными в условиях серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации. Минералого-петрографические признаки гидротермально-метасоматических изменений, связанных с интрузивным магматизмом, не выявлены. Рудная минерализация представлена пиритом с подчиненным количеством пирротина, халькопирита, галенита, сфалерита, сульфидов и сульфоарсенидов кобальта и никеля. Золото образует включения в пирите, реже свободные зерна. На объектах выделяются золото-сульфидный и золото-сульфидно-кварцевый рудно-формационные типы [Паленова и др., 2015].

Важнейшей особенностью черных сланцев является существенная (более 1 об. % по [Петтиджон, 1981]) примесь углеродистого вещества (продукта преобразования органики), что определяет геохимическую специфику отложений. Так, накопление Au, Ag, Cu, Zn, Cd, As, Se, Sb, а также U, Th и REE органическим веществом в сорбированной и металлоорганической форме доказано как прямыми анализами рассеянного углеродистого вещества пород золоторудных и полиметаллических месторождений [Ермолаев, Созинов, 1986; Юдович, Кетрис, 1994; Развозжаева и др., 2002], так и экспериментальными данными [Кузьмина, 2006; Плюсина и др., 2009]. Кроме того, черносланцевые отложения содержат сингенетичные сульфиды, в частности, пирит и гидротроилит, которые также являются геохимическим барьером для осаждения благородных металлов и халькогенидов [Юдович, Кетрис, 1994]. U, Th, REE, Ti и Ba преимущественно сорбируются глинистым веществом осадка [Балашов, 1976; Юдович, Кетрис, 1994; Mernagh, Miezitis, 2008]. При диагенезе, катагенезе и метаморфизме происходит преобразование органического вещества и глинистых минералов, сопровождающееся высвобождением примесей, а также перетложение сульфидов с выделением неструктурных примесей.

Таким образом, поведение металлов в углеродистых осадках месторождений Артемовского рудного узла в наиболее общем виде может быть представлено следующей последовательностью.

1) *Сингенетичное накопление в формах, связанных с органическим веществом, глинистыми минералами и наиболее ранними сульфидами.* Формирование терригенных отложений Бодайбинского синклинория происходило в несколько этапов: 1) медвежевско-баллаганахский; 2) дальнетайгинско-жуинский (вачская свита); 3) юдомский (догалдынская свита) [Немеров и др., 2010]. На медвежевско-баллаганахском этапе осадки накапливались в рифтогенном морском бассейне пассивной окраины юга Сибирского кратона, с которой происходил снос терригенного материала; в дальнетайгинско-жуинский этап – в условиях спрединга задугового бассейна и

влияния островодужного (андезитового) вулканизма, часть терригенного материала поступала с юга (Байкало-Муйская зона, островодужная система); в юдомский этап – в условиях бассейна форланда при сносе терригенного материала с юга [Немеров и др., 2010].

Таким образом, вачская свита отлагалась в условиях смены тектонического режима от задугового бассейна к бассейну форланда, догалдынской – в условиях форланда. Осадконакопление происходило под влиянием островодужного вулканизма и в условиях размыва пород островной дуги, что способствовало сингенетичному накоплению Au, Ag, Cu, Zn, Cd, As, Se, Sb с органическим веществом, а также их соосаждению с первичными сульфидами (пиритом). U, Th и REE сорбировались органикой и глинистым материалом, а также входили в состав металлоорганических соединений. Ti, Ba и Sr отлагались преимущественно в сорбированной форме на глинистых частицах.

2) *Диагенетическое перераспределение вещества.* На этом этапе происходит высвобождение сорбированных металлов и серы из углеводородных соединений на ранних стадиях изменения их структуры и вхождение примесей в состав диагенетического пирита. Последнее подтверждается составом микропримесей в син- и диагенетическом пирите месторождений Копыловское и Кавказ [Паленова и др., 2015]. Частичное окисление органического вещества способствует выделению свободной углекислоты, которая связывается с Ca и Mg поровых вод и избыточным Fe первичных сульфидов с образованием железистого доломита [Ермолаев, Созинов, 1986; Юдович, Кетрис, 1988]. Кристаллизация карбоната из углекислоты, выделившейся при окислении органического вещества, предполагается и для месторождения Сухой Лог [Гаврилов, Кряжев, 2008]. Также углеводороды теряют часть фосфора, что, совместно с преобразованием глинистых минералов и частичным высвобождением сорбированных на них редкоземельных элементов, приводит к началу кристаллизации алюмофосфатов – флоренсита $(Ce,La)Al_3(PO_4)_2(OH)_6$, гоацита $SrAl_3(PO_4)_2(OH)_5 \cdot H_2O$, горсейксита $BaAl_3(PO_4)(PO_3OH)(OH)_6$. Глобальный характер диагенетического образования флоренсита, горсейксита и крандаллита $CaAl_3(PO_4)_2(OH)_5 \cdot H_2O$ показан на примере разновозрастных (средний архей–ранний мел) отложений Австралии [Rasmussen, 1996].

3) *Перераспределение вещества при катагенезе и метаморфизме* приводит, в первую очередь, к высвобождению примесей из металлоорганических комплексов при графитизации органического вещества и очищению и переотложению сингенетичного пирита. По данным химико-битуминологического анализа углеродистое вещество месторождений Копыловское и Кавказ прошло все стадии катагенетического преобразования, характеризуется повышенным содержанием $C_{орг}$ и низкой долей битумоида (ХБА), составляющей 0.17–0.39 мас. % от $C_{орг}$ и около 0.005 мас. % от породы, и может содержать лишь незначительное количество связанных форм металлов [Паленова и др., 2015]. По данным ЛА-ИСП-МС в составе пирита от ранних диагенетических форм к поздним катагенетическим и синметаморфическим уменьшается содержание микропримесей Au, Ag, Co, Pb, Sb, Bi, Te, Ba, Mo и Tl и увеличивается – Ni, Cu, As, Se, наиболее значительно – U [Паленова и др., 2015]. Высвобождение металлов и серы приводит к формированию сульфидов и сульфосолей цветных металлов и самородного золота в виде микровключений в пирите и свободных зерен. Подобные процессы наблюдались на ряде орогенных месторождений золота [Large et al., 2007]. Метаморфическое окисление органического вещества способствует выделению CO_2 и повышению кислотности порового раствора [Ермолаев, Созинов, 1986;

Юдович, Кетрис, 1988]. Часть пирита окисляется с образованием магнетита и ярозита $K_2Fe_6(SO_4)_4(OH)_{12}$ (рудопоявление Красное). Происходит растворение кремнезема и его локальное переотложение в виде кварцевых «микролинз» и оторочек вокруг кристаллов пирита. Подобный механизм обсуждался и для месторождения Сухой Лог [Гаврилов, Кряжев, 2008]. Кроме того, наблюдается переотложение железистого доломита с образованием карбонатов сидерит-магнетитового ряда. Метаморфизм глинистого вещества приводит к образованию калиевых слюд и парагонита (в локальных участках пересыщения раствора натрием), при этом высвобождаются U, Th, REE, Ti и В. Наблюдается дальнейший рост флоренсита, образование рутила, часто в виде оторочек вокруг микролинз кварца, и турмалина (каймы регенерации вокруг обломков турмалина, новообразованные игольчатые кристаллы). Уран частично входит в состав позднего пирита, вероятность чего подтверждается радиологическим изучением ураноносных черных сланцев [Ермолаев, Созинов, 1986; Юдович, Кетрис, 1994].

4) *Процессы динамометаморфизма* приводят к локальному растворению рудных минералов, мобилизации и переотложению металлов в наиболее благоприятных структурных позициях (замки складок, зоны влияния разломов).

Таким образом, источником вещества для образования золоторудных месторождений Артемовского узла являлись исходно металлоносные углеродистые толщи. Перераспределение и концентрирование металлов происходило при диагенезе, катагенезе, метаморфизме и динамометаморфизме. Выводы о коровом источнике металлов подтверждаются изотопным анализом свинца в пирите месторождений Копыловское и Кавказ и в галените рудопоявления Красное [Belogub et al., 2014].

Автор выражает благодарность д.г.-м.н. Е. В. Белогуб, д.г.-м.н. В. В. Масленникову, к.г.-м.н. О. Ю. Плотинской, к.г.-м.н. А. В. Чугаеву и к.г.-м.н. К. А. Новоселову за ценные консультации и помощь на всех этапах работы. Исследования выполнены в рамках бюджетной темы № 01201350139 лаборатории минералогии рудогенеза ИМин УрО РАН.

Литература

- Балашов Ю. А. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 267 с.
- Буряк В. А. Метаморфизм и рудообразование. М.: Недра, 1982. 256 с.
- Гаврилов А. М., Кряжев С. Г. Минералого-геохимические особенности руд месторождения Сухой Лог // Разведка и охрана недр. 2008. № 8. С. 3–16.
- Ермолаев Н. П., Созинов Н. А. Стратиформное рудообразование в черных сланцах. М.: Наука, 1986. 174 с.
- Иконникова Т. А., Дубинина Е. О., Сароян М. Р., Чугаев А. В. Изотопный состав кислорода жильного кварца и вмещающих пород на месторождении Сухой Лог (Россия) // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51. № 6. С. 560–567.
- Кондратенко А. К. Магматические комплексы центральной части Ленской провинции и их металлогеническая специализация. М.: Недра, 1977. 144 с.
- Кузьмина Т. В. Исследование хемосорбции золота и платины на углеродистое вещество в связи с проблемой металлоносности черных сланцев // Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Владивосток, 2006. 28 с.
- Лаверов Н. П., Чернышев И. В., Чугаев А. В. и др. Этапы формирования крупномасштабной благороднометальной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия): результаты изотопно-геохронологического изучения // Доклады Академии наук. 2007. Т. 415. № 2. С. 236–241.

Немеров В. К., Станевич А. М., Развозжаева Э. А. и др. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 729–747.

Паленова Е. Е., Белогуб Е. В., Плотинская О. Ю. и др. Эволюция состава пирита на золоторудных месторождениях в черносланцевых толщах Копыловское и Кавказ (Бодайбинский район, Россия) по данным РСМА и ЛА-ИСП-МС // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 1. С. 71–92.

Петтиджон Ф. Дж. Осадочные породы. М.: Недра, 1981. 751 с.

Плюснина Л. П., Кузьмина Т. В., Лихойдов Г. Г. Влияние серы на хемосорбцию золота углеродистым веществом при 200–400 °С и $P_{\text{общ}} = 1$ кбар // Доклады Академии наук. 2009. Т. 429. № 6. С. 806–808.

Развозжаева Э. А., Прокофьев В. Ю., Спиридонов А. М. и др. Благородные металлы и углеродистое вещество в рудах месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия) // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44. № 2. С. 116–124.

Русинов В. Л., Русинова О. В., Кряжев С. Г. и др. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 1. С. 3–46.

Чугаев А. В., Плотинская О. Ю., Чернышев И. В., Котов А. А. Неоднородность изотопного состава Pb в сульфидах различных парагенетических ассоциаций на золоторудном месторождении Вернинское (Байкало-Патомское нагорье, Россия) // Доклады Академии наук. 2014. Т. 457. № 3. С. 1–6.

Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 272 с.

Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург: УИФ Наука, 1994. 304 с.

Mernagh T. P., Miezitis Y. A review of the geochemical processes controlling the distribution of thorium in the earth's crust and Australia's thorium resources // Geoscience Australia. 2008. 48 p.

Belogub E. V., Palenova E. E., Chugaev A. V., Plotinskaya O. Yu. Origin of gold ores in black-shale hosted deposits of the Bodaybo region, Russia // Acta Geologica Sinica (English Edition). 2014. Vol. 88 (Supp. 2). P. 252–253.

Distler V. V., Yudovskaya M. A., Mitrofanov G. L. et al. Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia // Ore Geology Reviews. 2004. Vol. 24. P. 7–44.

Goldfarb R. J., Groves D. I., Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis // Ore Geology Reviews. 2001. Vol. 18. P. 1–75.

Large R. 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.

Rasmussen B. Early-diagenetic REE-phosphate minerals (florencite, gorceixite, crandallite, and xenotime) in marine sandstones: a major sink for oceanic phosphorus // American Journal of Science. 1996. Vol. 296. P. 601–632.