

Е.Е. Барабашева, М.С. Брылева

К ВОПРОСУ О ФОРМАХ НАХОЖДЕНИЯ И МЕХАНИЗМАХ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ЗОЛОТА УГЛЯМИ НА ПРИМЕРЕ ЗАБАЙКАЛЬСКИХ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Одним из основных вопросов освоения угольных месторождений Забайкальского края является вопрос комплексного освоения месторождений, включающее извлечение из углей благородных металлов (золота, серебра и платиноидов). Уровень концентрации золота в углях дает возможность рассматривать Забайкальский край в качестве объекта для проведения ревизионно-опробовательских работ на золото с целью выявления локальных участков для оценки и попутной добычи (в настоящее время таких работ на территории края не проводится). Определение форм нахождения золота в углях имеет важное значение для выявления условий его накопления, выявления закономерностей размещения золота в угольных месторождениях, поведения его при переработке углей, а также для эффективных методов извлечения золота из углей. Концентрация золота углями происходила поэтапно и циклично, при этом задействованы были следующие процессы: 1) прижизненная концентрация золота определенными видами растений, входящих в углефицированную массу; 2) сорбция золота из вулканических гидротерм торфяной и буроугольной массой на стадии углеобразования; 3) инфильтрация золота из близлежащих рудопроявлений и фильтрационное накопление его на геохимических угольных барьерах; 4) бактериальное накопление золота в углях. Ключевые слова: биосорбция золота, концентрация золота в углях, прижизненная концентрация золота растениями, сорбция гидротермального золота буроугольной массой, инфильтрация золота, бактериальное накопление золота в углях.

Одним из нерешенных, но давно назревших вопросов является комплексное освоение месторождений, включающее извлечение из углей большого спектра элементов примесей, и, в частности, благородных металлов (золота, серебра и платиноидов).

В настоящее время из углей и углеотходов в промышленных масштабах получают только германий и золото. Разработаны

технологии извлечения галлия, скандия, урана и итрия (Комиссарова и др., 1969, Шацкий и др., 1979, Леонов и др., 1998).

Забайкальский край обладает уникальными угольными ресурсами (48 месторождений и 18 углепроявлений). Месторождения характеризуются небольшими размерами по площади (десятки-первые сотни км²), относительно малой мощностью углевмещающих отложений (сотни-тысячи метров), разнообразным количеством угольных пластов и несложным тектоническим строением. Преобладают низко метаморфизованные угли, меньшим развитием пользуются газовые угли. К высоко метаморфизованным углям относятся только Апсатское месторождение и Урсинское проявление.

Среднее фоновое содержание золота в углях крупнейших месторождений составляет 0,01 г/т, локально высокое – 1–5 г/т, предельные – 40 г/т. Кларк золота в глинистых породах составляет 0,008 г/т, коэффициент концентрации фона к кларку – 1,25. Условия для количественного изучения распределения золота возникают при его содержании в золах углей не менее 0,02–0,1 г/т [13].

При использовании спектральных анализов для определения микроэлементов в углях, концентрация золота находится ниже чувствительности анализа и зачастую не определяется. Необходимые результаты можно получить только при применении нейтронно-активационного, пробирного и других специальных методов аналитики.

По многим угольным месторождениям Забайкальского края отмечается повышенная золотоносность, обусловленная присутствием золота в пределах Забайкальской золотоносной провинции. Из 104 выделенных здесь рудных узлов 48 имеют четкую геохимическую специализацию на золото.

В образцах керна скважин в угольном пласте Тигнинском на южных флангах Тарбагатайского месторождения обнаружено видимое золото размером 0,02 мм [13]. Для определения золота и серебра в углях Забайкальского края были отобраны пробы на Кадалинском, Черновском, Алтанском, Красночикийском, Тарбагатайском, Мордойском, Олонь-Шибирском, Харанорском, Читкандинском, Арбагаро-Холбонском угольных месторождениях (Алексеев и др., 1967). Всего было отобрано 28 проб, которые в золе углей показали содержания золота и серебра от следов до 34 г/т [13]. На Апсатском и Читкандинском месторождениях было выявлено золото с содержанием 0,01 г/т в пересчете на сухой уголь. В объединенных пробах углей Харанорского

месторождения нейтронно-активационным и пробирным анализами установлены высокие (0,1–0,85 г/т) концентрации золота в ассоциации с редкими элементами [13].

Уровень концентрации золота в углях дает возможность рассматривать Забайкальский край в качестве объекта для проведения ревизионно-опробовательских работ на золото с целью выявления локальных участков для оценки и попутной добычи. К сожалению, в настоящее время таких работ на территории края не проводится.

Практическое решение вопросов комплексного освоения также ограничено в виду недостаточной изученности микроэлементного состава угольных месторождений Забайкалья.

Определение форм нахождения золота в углях имеет важное значение для выявления условий его накопления, выявления закономерностей размещения золота в угольных месторождениях, поведения его при переработке углей, а также для эффективных методов извлечения золота из углей. Для решения поставленных задач должны изучаться условия и механизмы концентрирования редких элементов и золота в углях, а именно комплексное влияние геологических, тектоно-магматических, гидрогеохимических, биогеохимических, минерагенических, палеогеографических, климатических, фациальных, эпигенетических и других факторов, влияющих на формирование углей.

В настоящее время нет отчетливых представлений о роли геологических процессов в накоплении золота угольными пластами, о формах его нахождения и механизмах концентрации.

Вероятно, концентрация золота углями происходила поэтапно и циклично, при этом задействованы были следующие процессы: 1) прижизненная концентрация золота определенными видами растений, входящих в углефицированную массу; 2) сорбция золота из вулканогенных гидротерм торфяной и бурогольной массой на стадии углеобразования; 3) инфильтрация золота из близлежащих рудопроявлений и фильтрационное накопление его на геохимических угольных барьерах; 4) бактериальное накопление золота в углях.

1. Прижизненная концентрация золота присуща практически всем растениям (в нанокolicествах оно необходимо для поддержания напряженности клеточных оболочек растений), но особенно ярко протекает среди золотофильных представителей флоры. Установлено, что в золе некоторых растений засушливых местностей содержится в 40–150 раз больше золота, чем в почве. К ним относятся желтушник седеющий *Erysimum*

canescens Roth., Brassicaceae; люцерна посевная *Medicago sativa* L., Fabaceae; виды полыни *Artemisia* L., Asteraceae (содержание золота колеблется от 4,7 до 85 г/т золы); зайцегуб опьяняющий *Lagochilus inebrians* Bunge, Lamiaceae; хвощ полевой *Equisetum arvense* L., Equisetaceae; кора дуба *Quercus* L., Fagaceae; береза бородавчатая *Betula pendula* Roth, Betulaceae; овсяница красная *Festuca rubra* L., Poaceae (содержание золота – 95,05 мг/т золы); кукуруза обыкновенная *Zea mays* L., Poaceae (содержание золота – 60 г/т золы); фацелия шелковая *Phacelia sericea* (Graham) A. Gray; виды жимолости *Lonicera* L., Caprifoliaceae. В ячмене и льне золото выявляется только в корнях в количестве 14–22 мкг/кг сухой массы. В шишках ели и сосны, растущих на почвах с содержанием золота 0,00002%, его концентрация возрастает в 50 раз.

Цианогенные растения способны накапливать золото в количестве более 10 мг/кг сухой массы. При этом водоросли могут превращать растворимое золото в металлическую форму, образуя на поверхности «золотой панцирь».

Экспериментальные исследования на Соловьевском золото-платиновом россыпном месторождении (АмурНИИ ДВО РАН) показали, что в пределах рудника клевер и лапчатка хорошо аккумуляруют золото, скерда – осмий, в зверобое, клевере и одуванчике накапливается рутений. В лесах, произрастающих над рудными телами, формируются биогеохимические аномалии, отмершая растительная масса в которых содержит «ураганное» количество драгметаллов (в трухе гнилых пней обнаружено самородное золото (200 мг/т), соли серебра (до 3 кг/т) и платины (5 г/т)) [13].

Одним из ярких биогеохимических индикаторов при поисках месторождений золота является береза (*Betula* sp.). Для определения содержания золота используется не только зола, но и березовый сок, который достаточно прост в аналитической обработке, так как представляет собой природный раствор, в котором содержание металлов определяется физико-химическими методами без всякой предварительной подготовки. Этот метод поиска золота проверялся на одном из коренных золоторудных месторождений в Западном Забайкалье [13]. Полученные результаты подтвердили возможность его использования на практике.

Угольные месторождения Забайкальского региона базируются на отложениях тургинской, кутинской свит и их корреляционных аналогах. Палеонтологические флористические остатки, слагающие угольные массы этих образований представле-

ны следующими родами: *Equisetum* sp. (хвощи), *Coniopteris* sp., *Cladophlebis* sp. (папоротники), *Czekanowska* sp., *Pseudolarix* sp. (хвойные), *Neozamites* sp., *Birisia* sp. (лиственные) и др., являющихся фактически предковыми формами нынешних золотофильных растений [4].

Неоспорима связь этой биоты с вулканизмом. Одним из наиболее важных факторов угленакопления, имеющих широкое распространение на территории Забайкальского края, особенно его юго-восточной части, является фактор синхронного вулканизма. Эпохи вулканизма и углеобразования в истории Земли закономерно чередуются. Вулканизм создает благоприятные биогенные и абиогенные условия для последующего накопления и консервирования растительной массы. Связь угленакопления с вулканизмом неоднократно рассматривалась в ряде публикаций Вана (1973), Желинского, Корнет (1995), Седых (2005) и др. [6, 9].

В разрезах осадочных пород, слагающих забайкальские угленосные бассейны, часто отмечается наличие пироклаستيки (пепловые туфы, туффиты, обломки пемз). Образования угольных пачек чередуются с пластами, сложенными вулканическим пеплом, иногда преобразованным в, так называемые, вулканогенные тонштейны или ортотонштейны [1].

Периодические выбросы пеплов при вулканических извержениях, циркуляция по разломам гидротерм и подземных вод, обогащенных микроэлементами, стимулировали рост растений, их местный гигантизм, а также способствовали накоплению золота в растительных клетках.

2. Эндогенная активность в виде вулканических эксплозий, жерловых фаций, формирования туфов и туфогенно-осадочных образований наблюдается во многих угленосных впадинах Забайкальского региона начиная со среднеюрского времени и заканчивая позднемеловым. Проявления магматизма в Забайкалье многочисленны и разнообразны, по времени они относятся к эпохам мезозоя и кайнозоя, предшествуя эпохам образования угольных формаций. Наиболее интенсивные проявления вулканизма и магматизма приурочены к раннему мезозою (триас, ранняя, частично средняя юра), это нашло отражение в составе вулканогенных и вулканогенно-осадочных свит (тамирской, цаган-хунтейской, ичетуйской, удинской, харюлгинской и др.). Пространственная приуроченность вулканогенных и магматических образований обычно связана с зонами глубинных и региональных разломов.

Мезозойский магматизм поздней юры и раннего мела завершился излиянием основных эффузивов, приуроченных к впадинам Западного и Центрального Забайкалья. Базальты (10–20 м) образуют прослои и горизонты, реже дайки и жилы среди торфяных и буроугольных отложений, где предположительно происходила сорбция золота из вулканогенных гидротерм. Биосорбция золота углистыми прослоями осуществлялась как в жидкой, так и в твердой фазах. Органическое вещество при этом выполняло функции продуцента лигандов для органо-металлических комплексов.

В пределах контура зоны промышленного оруденения содержание золота возрастает в местах стыковки с углистыми прослоями более чем в 20 раз (Балейское золоторудное месторождение) [4]. Именно углистые прослои являлись биосорбентами и концентраторами поступающего с флюидами золота. Увеличение концентрации жильного золота наблюдалось как при входе жилы в угольный прослой, так и на выходе, что может свидетельствовать о вторичном выносе сконцентрированного золота вновь поступающими флюидными растворами. В виду того, что для золота мигрирующие формы обратимы, оно может неоднократно выпадать из растворов в самородное состояние, а при возникновении условий для растворения вновь переходить в раствор и переноситься гидротермальными потоками. Растворение и новое осаждение золота обуславливает его укрупнение.

3. Процессы миграции (инфильтрации) и концентрирования золота подземными водами формировались на торфяной (буроугольной) стадии углеобразования при диагенезе органического вещества, при этом органическое вещество торфа выступало в качестве геохимического барьера, концентрирующего золото в виде органо-металлических комплексов. В Забайкалье, как правило, это наблюдается в районах, где одновременно развиты коренные золоторудные проявления и присутствуют низинные болота. Гуминовые кислоты и негидролизуемая фракция органического вещества сорбировали ионы золота, предположительно образуя органо-металлические формы.

Сотрудниками Института геологии и природопользования ДВО РАН Н.Г. Куимовой, Л.М. Павловой, А.П. Сорокиным и др. были произведены экспериментальные исследования, показавшие основные закономерности концентрирования и распределения золота в гуминовых кислотах и органическом веществе негидролизуемого остатка торфа. Исследования групп

пового состава торфа показали, что основным концентратором и носителем золота в торфяной залежи являются гуминовые кислоты, накапливающие до 70% от его общего содержания. Негидролизуемая часть органического вещества торфа менее активно концентрирует ионное золото – до 30% от его общего содержания. Максимальное количество металла содержится в средней части профиля торфяной залежи в виде органоминеральных комплексов или наночастиц элементного золота с последующим формированием пленок и рыхлых агрегатов [11].

4. Бактерии известны своей способностью переводить металлы из токсичного растворенного состояния в безопасное твердое. Таким образом, некоторые виды бактерий концентрируют золото. Два вида микроорганизмов *Cupriavidus metallidurans* и *Delftia acidovarans* установлены в тонких пленках на поверхности золотых отложений в австралийских золотоносных шахтах около 10 лет назад [14]. На сегодняшний день они обнаружены не только на золоте, но и в почве, торфяниках и в воде. Первый вид осаждает золото из раствора и накапливает его в виде наночастиц внутри клетки, а второй – за пределами клеточной оболочки, образуя, таким образом, вторичные отложения золота. Защиту от ионов золота бактериям обеспечивает специальный белок – дельфтибактин (*delftibactin*). Микроорганизм выделяет его в окружающую среду, когда «чувствует» присутствие ионов золота. Белок восстанавливает ионы до металлического золота, которое собирается в наночастицы размерами 25–50 нм. По мере роста бактерии вокруг нее образуются «очаги» золота. Минерализация золота под действием дельфтибактина из нейтрального водного раствора при комнатной температуре происходит за считанные секунды.

Ischiadicus metallidurans также способна накапливать токсичные ионы золота в своих клетках. Металлическое золото, как известно, химически неактивно, в отличие от ионов золота. Для защиты бактерии выработали систему детоксикации среды – ионы золота переводятся ими в безопасные наночастицы золота.

Тионовые бактерии широко распространены в природе. Они обитают в водоемах, почвах, угольных и золоторудных месторождениях. В условиях естественного залегания активность тионовых бактерий сдерживается отсутствием кислорода. При вступлении в контакт с воздухом в них развиваются микробиологические процессы, приводящие к выщелачиванию металлов.

В настоящее время исследуется возможность использования бактерий *Bacillus cereus* как индикатора золотоносности участ-

ков суши. В почве, богатой золотым песком, численность этих бактерий существенно увеличивается.

Одной из наиболее активных по отношению к золоту группой бактерий является разновидность, относящаяся к роду *Aeromonas*. Растворение золота ими осуществляется в несколько этапов (скрытая фаза, фаза нарастания интенсивности, стабильная фаза). Примерно через год интенсивность концентрирования снижается и бактерии разрушаются обычными микроорганизмами, оставляя после себя частички нанозолота [14].

В ИГИМ проводились эксперименты по бактериальному выщелачиванию золота из руд различных месторождений. Изучен состав рудничных вод и пород с целью получения культур, способных интенсифицировать процесс выщелачивания золота. В результате установлены следующие микроорганизмы: *Bacillus*, *Bacterium*, *Chromobacterium*, *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Sarcina*, *Thiobacillus*. Показано, что в присутствии продуктов метаболизма бактерий выщелачивание протекает быстрее (в 2–4 раза). Еще большая растворимость золота может быть достигнута путем разрушения клеточных оболочек различными реагентами (до 10–18 мг/л) [10].

Таким образом, задачи изучения благородных металлов в углях Забайкалья сводятся к следующему: 1) проведение ревизионно-опробовательских работ на угольных месторождениях края для выявления закономерностей размещения благородных металлов; 2) проведение исследований, направленных на выяснение форм нахождения благородных металлов в углях, их связей с органической и минеральной составляющими, зольностью для решения генетических и технологических вопросов; 3) проведение технологических испытаний по извлечению золота из углей на территории региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адмакин Л. А.* Литогенетические индикаторы тонштейнов // Литология и полезные ископаемые. – 2001. – № 1. – С. 26–36.

2. *Арбузов С. И., Рихванов Л. П., Левицкий В. М.* Золото в углях Сибири / Золото Сибири и Дальнего Востока. – Улан-Уде: БНЦ СО РАН, 2004. – С. 16–18.

3. *Арбузов С. И., Рихванов Л. П., Маслов С. Г. и др.* Аномальные концентрации золота в бурых углях и торфах юго-восточной части Западно-Сибирской плиты // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 7. – С. 25–30.

4. *Барабашева Е. Е.* Основы научного прогнозирования золоторудных месторождений Забайкальского края. – Чита: ЗабГУ, 2013. – 185 с.

5. Баранова Н. Н., Варшал Г. М., Велюханова Т. К. Комплексообразующие свойства природных органических веществ и их роль в генезисе золоторудных месторождений // Геохимия. — 1991. — № 12. — С. 1799–1803.

6. Ван А. В. Вулканизм и угленакопление / Вопросы литологии Сибири. — Новосибирск, 1973. — С. 14–21.

7. Варшал Г. М., Велюханова Т. К., Кошечева И. Я. Геохимическая роль гумусовых кислот в миграции элементов / Гуминовые вещества в биосфере / Под ред. Д. С. Орлова. — М.: Наука, 1993. — С. 97–117.

8. Варшал Г. М., Велюханова Т. К., Кошечева И. Я. и др. О концентрировании благородных металлов углеродистым веществом пород // Геохимия. — 1994. — № 6. — С. 814–823.

9. Желинский В. М., Корнет В. Н. Мезозойский вулканизм и формирование мощных угольных пластов в Южной Якутии / Геология угольных месторождений. — Екатеринбург: УГГА, 1995. — С. 124–135.

10. Константинов М. М. Биогенное концентрирование золота // Руды и металлы. — 2005. — № 6. — С. 69–74.

11. Куимова Н. Г., Павлова Л. М., Сорокин А. П. и др. Экспериментальное моделирование процессов концентрирования золота в торфах // Литосфера. — 2011. — № 4. — С. 131–136.

12. Кузьминых В. М., Сорокин А. П. Миграция и накопление золота при гипергенных процессах // Вестник ДВО РАН. — 2004. — № 2. — С. 113–119.

13. Наркелюн Л. Ф., Офицеров В. Ф. Комплексное использование ископаемых углей. — Чита: Поиск, 2000. — 270 с.

14. Chad W. Johnston, Morgan A. Wyatt, Xiang Li, Ashraf Ibrahim, Jeremiah Shuster, Gordon Southam & Nathan A. Magarvey. Gold biomineralization by a metallophore from a gold-associated microbe // Nature Chemical Biology. Published online 03 February 2013. Doi:10.1038/nchembio.1179. [PUB](#)

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Барabasheva Елена Евгеньевна¹ — кандидат геолого-минералогических наук, доцент, e-mail: barabasheva@mail.ru,

Брылёва Марина Сергеевна¹ — аспирант,

¹ Забайкальский государственный университет.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 9, pp. 194–203.

UDC 662.7

E.E. Barabasheva, M.S. Bryljova

ON THE QUESTION OF FORMS CONCENTRATING OF GOLD COALS FOR EXAMPLE TRANSBAIKAL COALFIELDS

One of the main issues of development of coal deposits of the Transbaikal Territory is the issue of integrated development of deposits, which include the extraction from coals of precious metals (gold, silver and platinum). The concentration value of gold in coals provides an opportunity to consider the Transbaikal territory as the object for carry out the revision-testing works on the gold to identify local areas for evaluation and passing extraction (at present such work in the region is not carries out). Determination of forms of occurrence of gold

in coals have important to identify the conditions of its accumulation, the identification of patterns finding of gold in the coal fields, its behavior during processing of coals, as well as for effective methods of gold extraction from coals. The concentration of gold coals occurred in stages and cycles, at the same time have been arise the following processes: 1) concentration of gold during life of in certain types of plants included in coalified mass; 2) sorption of gold from volcanogenic hydrotherms masses of peat and coal at the stage formation of coal; 3) infiltration of the gold from nearest ore occurrences and its filtrational accumulation on geochemical barriers of the coal; 4) bacterial accumulation of gold in the coals. The tasks of studying the noble metals in the coals of Transbaikalia are reduces to carry out works of the revision-testing for detection regularities of placement of noble metals, studies aimed at clarifying the forms of existence noble metals in the coals and their bond with organic and mineral components.

Key words: biosorption of gold, the concentration of gold in the coals, concentration of gold in the during life of plants, sorption of hydrothermal gold in mass of lignite, infiltration of gold, bacterial accumulation of gold in the coals.

AUTHORS

*Barabasheva E.E.*¹, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Assistant Professor, e-mail: barabasheva@mail.ru,

*Bryljova M.S.*¹, Graduate Student,

¹ Transbaikal State University, 672039, Chita, Russia.

REFERENCES

1. Admakin L. A. *Litologiya i poleznye iskopaemye*. 2001, no 1, pp. 26–36.
2. Arbutov S. I., Rikhvanov L. P., Levitskiy V. M. *Zoloto Sibiri i Dal'nego Vostoka* (Gold of Siberia and Russia's Far East), Ulan-Ude, BNTs SO RAN, 2004, pp. 16–18.
3. Arbutov S. I., Rikhvanov L. P., Maslov S. G. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2004, vol. 307, no 7, pp. 25–30.
4. Barabasheva E. E. *Osnovy nauchnogo prognozirovaniya zolotorudnykh mestorozhdeniy Zabaykal'skogo kraya* (Principles of scientific forecasting of gold deposits in the Transbaikalian area), Chita, ZabGU, 2013, 185 p.
5. Baranova N. N., Varshal G. M., Velyukhanova T. K. *Geokhimiya*. 1991, no 12, pp. 1799–1803.
6. Van A. V. *Voprosy litologii Sibiri* (Issues of lithology in Siberia), Novosibirsk, 1973, pp. 14–21.
7. Varshal G. M., Velyukhanova T. K., Koshcheeva I. Ya. *Guminovye veshchestva v biosfere*. Pod red. D. S. Orlova (Humic compounds in biosphere. Orlov D. S. (Ed.)), Moscow, Nauka, 1993, pp. 97–117.
8. Varshal G. M., Velyukhanova T. K., Koshcheeva I. Ya. *Geokhimiya*. 1994, no 6, pp. 814–823.
9. Zhelinskiy V. M., Kornet V. N. *Geologiya ugol'nykh mestorozhdeniy* (Geology of coal deposits), Ekaterinburg, UGGGA, 1995, pp. 124–135.
10. Konstantinov M. M. *Rudy i metally*. 2005, no 6, pp. 69–74.
11. Kuimova N. G., Pavlova L. M., Sorokin A. P. *Litosfera*. 2011, no 4, pp. 131–136.
12. Kuz'minykh V. M., Sorokin A. P. *Vestnik DVO RAN*. 2004, no 2, pp. 113–119.
13. Narkelyun L. F., Ofitserov V. F. *Kompleksnoe ispol'zovanie iskopaemykh ugley* (Integrated use of mineral carbons), Chita, Poisk, 2000, 270 p.
14. Chad W. Johnston, Morgan A. Wyatt, Xiang Li, Ashraf Ibrahim, Jeremiah Shuster, Gordon Southam & Nathan A. Magarvey. Gold biomineralization by a metallophore from a gold-associated microbe. *Nature Chemical Biology*. Published online 03 February 2013. Doi:10.1038/nchembio.1179.