

# БИОГЕННОЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ ЗОЛОТА В ПРИРОДНЫХ ЛАНДШАФТАХ И В УСЛОВИЯХ ЭКСПЕРИМЕНТА

**Куимова<sup>1</sup> Н.Г., Павлова<sup>1</sup> Л.М., Юсупов<sup>2</sup> Д.В.**

<sup>1</sup>*Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск,  
e-mail: ngkuimova@mail.ru*

<sup>2</sup>*Амурский государственный университет, г. Благовещенск,  
e-mail: yusupovd@mail.ru*

Основной особенностью миграции химических элементов в биосфере является наличие биогенной формы, обуславливающей биологический круговорот элементов в земной коре. «Живое вещество в биосфере играет основную роль и не может быть сравнимо ни с какой геологической силой по своей активности и направленности во времени...» [Вернадский, 1994]. В геохимии и экологической геохимии концентрирование элементов организмами рассматривается как проявление биогеохимических барьеров. Биогеохимические барьеры составляют отдельный класс геохимических барьеров и представляют «выборочное накопление химических элементов живыми организмами» [Алексеев, 2000; 2011]. При расчете концентрирования элементов на биогеохимических барьерах используют коэффициент биологического поглощения (КПБ), показывающий во сколько раз содержание элемента в золе растений выше, чем в питающей его почве. При величине КПБ > 1 уже можно говорить о накоплении элемента растением, а значит и о формировании биогеохимического барьера.

В настоящее время в литературе имеется достаточное количество данных о концентрировании золота растениями, произрастающими на рудных площадях [Бабичка, 1954; Летунова, Ковальский, 1978; Olsen et al., 1981; Kotrba et al., 1994]. В золе берез, произрастающих в районах золоторудных месторождений Восточного Забайкалья, содержание золота колеблется от 0.5 до 10 г/т [Минеев, 1976]. В золе некоторых видов растений Узбекистана содержание благородного металла достигает 0.3-36 г/т. что во много раз превышает его содержание в подстилающей породе.

Накопление высоких концентраций золота продолжается в период торфообразования, о чем свидетельствуют данные изучения современных торфяников Западной Сибири [Арбузов и др, 2004], Уэльса [Andrews, Fuge, 1986], Индонезии [Palmer, Cameron, 1989]. Благодаря интенсивной жизнедеятельности микроорганизмов, перерабатывающих растительный материал, обеспечиваются резкие перепады окислительно-восстановительного потенциала (ox/red), создается кислотно-щелочная зональность, которые обеспечивают подвижность и доступность элементов.

В настоящее время достаточно убедительно показано, что микроорганизмы имеют особое значение в процессах концентрирования химических элементов в корках выветривания. Это обусловлено не только огромным разнообразием занимаемых ими экологических ниш, но и большими возможностями их ферментативного аппарата. К тому же бактерии имеют самую высокую сорбционную способность из всех форм жизни, так как имеют самое высокое отношение площади поверхности к объему клетки и отрицательно заряженную поверхность по отношению к окружающей среде [Trudinger, Swaine, 1979; Beveridge, 1989]. Концентрация золота микроорганизмами относительно окружающей среды достигает от  $10^4$  до  $10^5$  степени [Mann et al., 1987] – это очень высокий концентрационный фактор, учитывая низкое кларковое содержание Au в природе (2-6 мг/т).

Для оценки масштабов биогенного концентрирования золота выполнены полевые и экспериментальные исследования с учетом всех факторов биогенной миграции элементов – растений, торфа, микроорганизмов. Биогеохимические исследования проведены на двух участках: территории Покровского золоторудного месторождения и в бассейне р. Улунга

(россыпное месторождение золота), расположенных в таежно-мерзлотной зоне Верхнего Приамурья.

Рельеф исследуемых территорий представлен заболоченными долинами с пологими склонами, переходящими в плоские водоразделы. По долинам рек и ручьёв, в нижних частях склонов в значительной степени развиты торфяно-глеевые и болотные торфяные почвы. Условия залегания этих почв обуславливают формирование торфянистого горизонта и развитие глеевых процессов. Район входит в зону распространения островной многолетней мерзлоты долинного типа мощностью до 50 м. В зоне холодных длительно промерзающих почв замедлено разложение органических веществ, что способствует торфообразованию. Таким образом, в таежных ландшафтах Верхнего Приамурья к основным факторам биогенного концентрирования благородных металлов относятся: растения, торфянистый горизонт заболоченных территорий и деятельность микроорганизмов.

#### Концентрирование золота растениями.

Видовой состав древесного яруса на территории Покровского месторождения представлен лиственницей даурской (*Larix dahurica*), березой плосколистной (*Betula platyphylla*), сосной обыкновенной (*Pinus silvestris*) с обильно развитым густым подлеском из рододендрона даурского (*Rhododendron dahurica*) и багульника болотного (*Ledum palustre*). Биообъектами для опробования послужили кора лиственницы даурской и берёзы плосколистной, ветви с листьями рододендрона даурского и его сухостой [Юсупов, 2009]. Выполненные исследования показали, что уровень содержания золота в литохимических пробах на два порядка ниже, чем в пробах растительного материала. В соответствии со средними значениями содержания золота в золе исследуемых растений можно построить следующий ранжированный ряд: **рододендрон даурский, сухостой (2.52 г/т) > кора берёзы плосколистной (1.84 г/т) > кора лиственницы даурской (1.69 г/т) > рододендрон даурский, живые ветки (1.36 г/т).**

В долине ручья Малый Алкаган растительный покров представлен осоково-гипновым, кустарничко-осоково-сфагновым комплексами с багульником болотным (*Ledum palustre*) и голубикой (*Vaccinium uliginosum*). Марь занята преимущественно видами кустарниковых берез (ерником), состоящими из березы кустарниковой (*Betula exilis*) и овальнолистной (*Betula ovalifolia*). Повсеместно в долине распространены кустарники ивы черниковидной (*Salix myrtilloides*) и коротконожковой (*Salix brachypoda*), а также таволги иволистной (*Spiraea salicifolia*). Объектом опробования послужили три доминирующих вида многолетних растений – ива черниковидная (*Salix myrtilloides*), ива коротконожковая (*Salix brachypoda*) и береза кустарниковая (*Betula exilis*). Эти виды относятся к группе безбарьерных биообъектов и являются информативными биогеохимическими индикаторами Au, Ag [Ковалевский, 2002]. Выявлены следующие содержания золота в золе указанных растений [Юсупов, 2010]: **ива коротконожковая (0.06-10.47 г/т) > ива черниковидная (0.05-4.86 г/т) > береза кустарниковая (0.12-1.68 г/т).**

#### Концентрирование золота торфом.

Накопление торфяных залежей происходит в болотных системах за счёт неполной деструкции растительных остатков. В таежных ландшафтах торфянистый горизонт формируется неравномерно: на склонах – 5-20 см, тогда, как в долинах достигает от 40 см до 4 м. Потенциальная возможность и масштабы концентрирования золота торфом выявлены в модельных экспериментах. В качестве объекта исследования использован высокозольный низинный торф мощностью 2 м. Условия эксперимента были унифицированы: высушенные до воздушно-сухого состояния и гомогенизированные навески торфа (1 г) из разных горизонтов (0-10, 50-60, 100-110, 170-180, 180-190 см) помещали в колонки. В течение 80-ти суток по каплям добавляли раствор ионного золота ( $\text{HAuCl}_4$ ) с концентрацией 5.9 мкг/мл. Через определённые промежутки времени (1 сутки, 3 суток, 10 суток, 30 суток, 80 суток) отбирали аликвоты раствора, просачивающегося через слой торфа, для определения остаточного количества золота атомно-абсорбционным методом (спектрофотометр Hitachi

180-50). По окончании эксперимента электронно-микроскопическим методом исследовали ультраструктуру частиц торфа, формы нахождения золота, а также выполнен зондовый микроанализ (сканирующий микроскоп JEOL/LEO JSM-6390).

Результаты модельного эксперимента показали, что содержание золота в низинном торфе после инфильтрации золотосодержащих растворов увеличивалось вниз по профилю от 0.165 до 0.286 мг Au/г торфа, достигая максимума в средней части профиля. Степень извлечения золота торфом от общего объема инфильтрационного раствора изменялась от 29 до 40% с максимальным значением в наиболее гумусированном среднем горизонте (100-110 см). При продолжительной инфильтрации растворов через природный сорбент (30-80 суток) обнаружено присутствие нанодисперсного золота в пробах торфа, что свидетельствует о восстановлении ионного золота органической матрицей. Масштабы концентрирования золота в торфяном горизонте можно рассчитать, зная влажность, мощность залегания торфа и концентрацию золота в грунтовых и поверхностных водах (при концентрации золота 6 мкг/мл накопление золота в торфяном слое достигает 0.03% в пересчете на сухой вес торфа).

В условиях периодического оттаивания и промерзания пород таежных ландшафтов Верхнего Приамурья и смене окислительно-восстановительного режима увеличивается подвижность, миграционная способность золота, в результате чего происходит инфильтрация растворов через торфяной горизонт. Этим объясняется повышенное содержание золота в растениях и торфах в районах золоторудных полей Сибири и Дальнего Востока.

#### Концентрирование золота микроорганизмами.

В лабораторных модельных экспериментах изучены концентрационные функции микроорганизмов, выделенных из пород и почвогрунтов рудных и россыпных месторождений Амурской области. В зависимости от равновесной концентрации золота в растворах можно представить следующие ранжированные ряды сорбции золота биомассой бактерий и микроскопических грибов (Куимова, 2004):

– при концентрации золота в растворе меньше 20 мкгAu/мл

***B. subtilis* (62 мг/г) < *B. megaterium* < *P. chrysogenum* < *M. luteus* (125 мг/г)**

– при концентрации золота 20- 60 мкгAu/мл

***B. subtilis* (80 мг/г) < *B. megaterium* < *P. chrysogenum* = *M. Luteus* (160 мг/г)**

– при концентрации золота > 60 мкгAu/мл

***B. subtilis* (100 мг/г) < *B. megaterium* (125 мг/г) < *M. luteus* (165 мг/г) < *P. chrysogenum* (200 мг/г).**

Результаты исследований показали, что лучшими сорбционными свойствами обладает биомасса *P. chrysogenum* и *M. luteus*, которые имеют сравнительно одинаковую высокую емкость поглощения, изменяющуюся в зависимости от концентрации золота в растворе. Процесс сорбции ионного золота биомассой микромицетов происходил в широком диапазоне значений pH (от 2 до 9) с выраженным максимумом емкости извлечения металла при pH 5.

Результаты полевых и лабораторных исследований показали, что концентрирование золота микроорганизмами на два-три порядка выше, чем органическим веществом торфа, тогда, как торф накапливает его на порядок выше растений, произрастающих в таежных ландшафтах. Таким образом, для оценки масштабов концентрирования благородных металлов на биогеохимических барьерах в природных ландшафтах необходимо учитывать концентрационные функции всех факторов биогенной миграции элементов – растений, торфа, микроорганизмов.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президиума ДВО РАН 12-III-A-08-142.*

## Литература

- Алексеев В.А. К вопросу о биогеохимических барьерах / Биокосные взаимодействия в природных и антропогенных системах. – СПб: ВВМ, 2011. С. 7-11.
- Алексеев В.А. Экологическая геохимия. – М.: Логос. 2000. – 627 с.
- Арбузов С.И., Рихванов Л.П., Маслов С.Г., Архипов В.С., Павлов З.И. Аномальные концентрации золота в бурых углях и торфах юго-восточной части Западно-Сибирской плиты // Известия томского политех. ун-та. 2004. Т. 307. № 7. С. 25-30.
- Бабицкая И. Золото в организмах. Геохимические методы поиска рудных месторождений. – М.: Иностран. лит., 1954. 373 с.
- Вернадский В.И. Живое вещество и биосфера. – М.: Наука, 1994. – 672 с.
- Ковалевский, А.Л. Выбор объектов опробования растений при биогеохимических поисках серебра // Отечественная геология. 2002. № 3. С. 47-54.
- Куимова Н.Г. Аккумуляция и кристаллизация золота микроорганизмами, выделенными из рудных и россыпных месторождений. – Владивосток: Дальнаука. 2004. – 135 с.
- Летунова С.В., Ковальский В.В. Геохимическая экология микроорганизмов. – М.: Наука, 1978. – 145 с.
- Минеев Г.Г. Участие микроорганизмов в геохимическом цикле миграции и концентрирования золота // Геохимия. 1976. № 4. С. 577-582.
- Юсупов Д.В. Биогеохимическая индикация золотоносных супераквальных закрытых ландшафтов Верхнего Приамурья // Вестник АМГУ. 2010. Вып. 49. С. 74-81.
- Юсупов Д.В. Биогеохимические ореолы золота и ртути Покровского золоторудного месторождения (Верхнее Приамурье) // Известия ВУЗов. 2009. № 6. С. 38-43.
- Andrews M.J., Fuge R. Cupriferous bogs of the Coed y Brenin area, North Wales and their significance in mineral exploration // Appl. Geochem. 1986. V.1. P. 519-525.
- Beveridge T.J. Role of cellular design in bacterial metal accumulation and mineralization // Annu. Rev. Microbiol. 1989. V. 43. P. 147 - 171.
- Kotrba P., Ruml T., Masek T. Vazba cadmia bunkami mikroorganismu a rostlin // Chem. Listy. 1994. V. 88. № 10. P. 642-649.
- Mann H., Tasaki K., Fife W.S. et al. Cellular precipitation and heavy-metal sorption in *Euglena* sp.: implication for biomineralization // Chem. Geol. 1987. V. 63. № 1. P. 39-43.
- Olsen R.A., Clark R.B., Bennett J.H. The enhancement of soil fertility by plants roots // Am. Sci. 1981. V. 69. P. 378-383.
- Palmer C.A., Cameron C.C. The occurrence of gold and arsenic in Sumatra, Indonesia, peat deposits // J. Coal Qual. 1989. V. 8. № 3-4. P.122.
- Trudinger P.A., Swaine D.G. Biogeochemical cycling of mineral forming elements. – Amsterdam: Elsevier, 1979. – 612 p.