

**РОЛЬ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПРОЦЕССАХ МИГРАЦИИ,
МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ И РУДОГЕНЕЗА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ
БИОГЕОХИМИЧЕСКОГО РЕЦИКЛИНГА**

Е.Е. Барабашева

*Горный факультет, Забайкальский Государственный Университет, 672039, г. Чита, ул. Кастринская 1,
корпус 2, Россия*

Статья посвящена участию органического вещества и живых организмов в процессах литогенеза, рудогенеза и минералообразования на различных стадиях – биоаккумуляции, биосорбции, биоокисления, биовосстановления, биоосаждения, биоконцентрирования, на стадии биогипергенного разрушения пород, на стадии трансформирующей деятельности биоты и органического вещества при образовании металлоорганических комплексов. Для процессов рудогенеза выявлена ключевая роль органического вещества на различных этапах геологической истории с точки зрения биогеохимического рециклинга - направленного процесса, приводящего к этапному образованию (концентрированию) рудных компонентов в составе будущих месторождений.

биогеохимический рециклинг, биоаккумуляция, биосорбция, биоокисление, биовосстановление, биогипергенез

**THE ROLE OF ORGANIC MATTER IN THE MIGRATION PROCESSES,
MINERALIZATION AND ORE GENESIS FROM THE POINT OF VIEW OF
BIOGEOCHEMICAL RECYCLING**

E.E. Barabasheva

The article is devoted to the participation of organic matter and living organisms in the process of lithogenesis, ore Genesis and mineral formation at different stages - bioaccumulation, biosorption, the oxidation process, bioremediation, bioprecipitation, bioconcentration on stage bioperene destruction of rocks, at the stage of transforming activity of biota and organic matter in the formation of ORGANOMETALLIC complexes. For processes of ore Genesis, the key role of organic matter in various stages of geological history from the point of view of biogeochemical recycling directional process, leading to landmark education (concentration) of ore components in the composition of future deposits.

biogeochemical recycling, bioaccumulation, biosorption, bio-oxidation, bioremediation, bioperene.

Установлено, что организмы могут использовать рудообразующие элементы как в качестве источников микроэлементов, энергии или акцепторов электронов прижизненно, так и концентрировать их после своей гибели. В первом случае имеют место процессы биоаккумуляции, а после отмирания биоты – процессы биосорбции. Процессы биоаккумуляции и биосорбции, в свою очередь, можно подразделить на отдельные виды – биоокисление, биовосстановление, биоосаждение, биоконцентрирование. Нельзя не отметить также участие микроорганизмов в гипергенном разрушении горных пород и миграционной деятельности по переносу рудообразующих компонентов.

В образовании рудных месторождений участвуют многие виды организмов. Наиболее многочисленными являются группы бактерий аэробов и анаэробов, основными функциями

которых являются биоокисление и биовосстановление. Огромную роль, как в преобразовании оболочек планеты, так и в рудогенетических процессах, сыграли цианобактериальные маты, составляющие автономные специфические биоценозы [Розанов, 2002]. Их основными функциями являлись биоосаждение и биоконцентрирование рудного вещества. Многочисленны находки псевдоморфоз золота по микроводорослям, примитивным грибам и филаментным бактериям, которые являлись одновременно биоосадителями, биоконцентраторами и мигрантами рудного вещества [Куимова, 2006]. При образовании эндогенных месторождений основная роль отводится углеродистым породам, являющимся остатками былой биологической субстанции в виде продуктов метаболизма, отмершей углефицированной биомассы, остаточного керогена, гуминовых и фульвиокислот, которые являлись биоконцентраторами рудного вещества и участвовали в последующей его трансформации в составе металлоорганических комплексов. Основными участниками процессов гипергенного разрушения пород являются бактерии, цианобактерии, аэрофильные водоросли и грибы, подготавливающие субстрат для заселения лишайников и высших растений. В их функции входило непосредственное окисление переменного-валентных элементов, действие биогенных кислот и щелочей, хелатообразование и биосорбция. Специфика биоминеральных образований заключается в том, что их развитие связано не с физическими и химическими параметрами классической минералогии, а с биохимическими законами развития живой клетки.

Таким образом, формы участия биоты в миграционных, рудогенетических и биоминералогических процессах можно представить в виде таблицы (табл. 1). Практически для всех вышеперечисленных процессов основным компонентом влияния является количество живой биоты и органогенного вещества, которые, в свою очередь, тесно связаны с палеогеографическими, климатическими, тектономагматическими, космическими и прочими косными факторами, значит, процессы биогенеза есть необходимый фактор стадийного концентрирования и переработки металлов в земной коре, приводящий к формированию рудных месторождений.

На Земле практически все глобальные геологические явления носят циклический характер. Говоря о комплексной модели рудообразования необходимо учитывать все влияющие на них факторы – космическую обстановку и, напрямую связанные с ней, тектоно-магматическую и биотическую активность, а также твердофазные процессы. Баланс всех факторов приводил к рудогенезу. При этом органический комплекс располагался и работал в верхней части земной коры, неорганический – в нижней. В зоне их пересечений наблюдаются конкурирующие циклические процессы в виде осаждения и новой мобилизации рудного вещества, так называемый **биогеохимический рециклинг**. Этот направленный процесс приводил к этапному образованию (концентрированию) рудных компонентов в составе будущих месторождений.

Таблица 1. **Формы участия биоты в миграционных, рудогенетических и биоминералогических процессах**

<i>Биогеохимические процессы</i>	<i>Виды органического вещества</i>	<i>Основные рудные компоненты, участвующие в процессе</i>	<i>Функции использования рудных элементов органикой и отмершей биомассой</i>	<i>Генетический тип месторождения</i>
Биоосаждение	Цианобактериальные маты, бактерии в общем спектре, микроводоросли, микромицеты	Fe, Cu, Mn, Ca, Co, Ni, Ag, Au, Pt, U	Получение энергии (бактерии, цианобактерии, микроводоросли), источник микроэлементов (микромицеты)	Осадочный, вулканогенный
Биоокисление	Бактерии	Fe, Mn, Cu, Ag, Au, Cd, Mo, U	Получение энергии	Осадочный, гидротермальный, вулканогенный
Биовосстановление	Бактерии	Mn, Fe, Cu, Cd, Ni, Zn, Pb, Au, Ag, As, Mo	Получение энергии	Осадочный, гидротермальный, вулканогенный
Биоконцентрирование, биогеохимические барьеры	Цианобактериальные маты, бактерии в общем спектре, микроводоросли, микромицеты, продукты метаболизма органического вещества, отмершая биомасса, кероген, макроорганизмы (двустворки, брахиоподы, губки, медузы, асцидии, актинии и др.)	Fe, Co, Ni, Cu, Au, Ag, Zn, Cd, Hg, Tl, Ti, Sn, Pb, As, Nb, Ta, Cr, Mo, W, Mn, V, U	Получение энергии (бактерии, цианобактерии, микроводоросли), источник микроэлементов (микромицеты, макроорганизмы), концентрирование в процессе отмирания и перегнивания биомассы	Осадочный, гидротермальный, метаморфогенный
Гипергенное разрушение	Бактерии, цианобактерии, микромицеты, аэрофильные водоросли, лишайники	Fe, Sn, Al, Au, Mn, Ni, Hg, Ag, Cu, Pb, Zn	Получение энергии (бактерии), источник микроэлементов (микромицеты, водоросли, лишайники)	Осадочный

Миграционные функции, образование металло-органических комплексов (МОК)	Бактерии, продукты метаболизма органического вещества, продукты распада отмершей биомассы, макроорганизмы (морской бентос, планктон)	Au, Ag, Pt, Sn, Cu, Fe, Mo, U	Получение энергии (бактерии), образование миграционных органометаллических комплексов(продукты метаболизма органического вещества, отмершая биомасса), перенос накопленных элементов в процессе жизнедеятельности макроорганизмов	Осадочный, гидротермальный, метаморфогенный, вулканогенный, магматогенный
Биоминералообразование	Макробиота (человек, млекопитающиеся, рептилии, амфибии, птицы)	Псевдоморфозы и замещение остатков животных пиритом, фосфатом железа, одонтолитом и др.	Прижизненное и посмертное образование минералов в организмах животных и растениях	Осадочный
Фоновые содержания	Бактерии, водоросли, морская и наземная макробиота	Порядка 70 основных химических элементов и микро-элементов	Прижизненные и посмертные биоосаждение и концентрация	Осадочный

В частности, для процессов золотообразования, можно предположить наличие трех основных генетических этапов [Барабашева, 2011]. *Первый этап* перераспределения рудного вещества и создания зон с повышенным содержанием элементов, включает: 1) аккумуляционное накопление и сорбирование биотой рудных компонентов, привносимых магматическими флюидами в мелководные бассейны седиментации; 2) образование сульфатредуцирующих цианобактериальных комплексов, мобилизирующих и фиксирующих окислительные и восстановительные (редуцирующие) процессы, а также способствующих разделению рудных компонентов на различные составляющие; 3) перевод биотой золота в мобильные формы, его транспортировка при помощи фульвио- и гуминовых кислот в составе металлоорганических комплексов, сорбция последних на геохимических барьерах. Роль биоты на первом этапе определяющая. *Второй этап* – разрушение

металлоорганических комплексов при воздействии повышенных температур, давления, тектонических напряжений, действий растворов и радиогенных эманаций. Углерод терял свою форму, связи в металлоорганических комплексах разрушались, и при наличии вулканической деятельности золото образовывало соединения с серой и мышьяком в виде сульфидов и арсенидов. Освободившийся углерод образовывал молекулярные связи в виде CO, CO₂ и ионные связи в виде CO₃²⁻, а водород входил в состав гидроксильных групп, повышая, тем самым, щелочность среды. *Третий этап* – экранирование сульфидного и укрупнение самородного золота прослоями углистого растительного вещества. Фиксированное золото далее связывалось с другими элементами в неорганической фазе.

Таким образом, при рассмотрении комплексной модели образования золоторудных объектов, можно говорить о первичной связи золота с углеродом, водородом, кислородом, азотом и фосфором (элементами, слагающими органические субстанции) в составе металлоорганических комплексов. На втором этапе, после разрушения металлоорганических комплексов, происходит неорганическая связь золота с вулканогенной серой и, возможно, мышьяком. На третьем этапе золото хемогенно связывается с медью, железом, молибденом, висмутом, свинцом, цинком, образуя при этом, как правило, комплексные месторождения.

Хемогенная связь золота на третьем этапе происходила в основном с биофильными элементами. В основу биофильности положена прямая и косвенная связь (ассоциируемость) рудообразующих элементов непосредственно с палеобиотой или продуктами ее метаболизма, представленная в таблице 2. Биогеохимический рециклинг – есть постоянная цикличная смена форм миграции и концентрирования рудных элементов, включающая вулканогенно-гидротермальные этапы рудоподведения, концентрацию терригенно-биогенными прослоями, гипергенно-биогенное разрушение первичной золотосодержащей матрицы, перенос в составе металлоорганических комплексов, последующий распад которых связан с новым этапом тектоно-магматической активизации, сопровождающейся флюидными и радиогенно-эманационными воздействиями, укрупнение за счет экранирования прослоями углистого растительного вещества освобожденных от углерода сульфидных или самородных форм золота, последующую связь золота с другими биофильными элементами.

Этап тектоно-магматической активизации сопровождался рифтогенным преобразованием пород, специфичность которого состоит в многообразии минерально-структурных парагенезов, многоэтапности их генерации, повышенной скорости захоронения осадков в рифтогенных депрессиях, незавершенности диагенетических процессов. Вследствие этого, система минеральных, органических и флюидных компонентов вскоре после седиментации оказывалась в глубинных условиях катагенеза. Диагенетически измененные металлоорганические и металлические формы элементов при повторении циклов тектоно-магматической активности вновь мобилизовались и концентрировались в месторождения. При этом месторождения образовывались не катастрофическим путем, а постепенно, и биота активно принимала участие в рециклинге, создавая условия концентрирования рудных растворов, уменьшаясь, при этом, в количестве.

Таблица 2. Ассоциируемость рудообразующих элементов с палеобиотой или продуктами ее метаболизма.

Типы взаимосвязи рудообразующих элементов с органическим веществом	S P Ca Mg Fe	Si Cu Ni Co Mn	U Th	Au Ag Pt	Mo, Se	Pb, Zn	W Sn?	As Tl Cd Sb?	Редкие, редкоземельные	Hg
1. Непосредственная концентрация рудообразующих элементов в живых клетках и макробиоте	+++	+	-	+	-	-	-	-	-	-
2. Рудообразующие элементы, переводимые в растворимые формы микроорганизмами или бактериями	+++	+	++	+++	-	+++	+	+	+	+(?)
3. Рудообразующие элементы, накапливающиеся в результате процессов сорбции и биосорбции органическим веществом	++	+	++	+++	++	+	+	+	++	-
4. Рудообразующие вещества, мигрирующие в форме органических комплексов	++	+	++	+++	+	+	+	+	+	-

Уменьшение количества $C_{орг}$ (0,1–1%) в прослоях содержащих видимое концентрированное золото таких месторождений Забайкалья, как Дарасун, Балей, Тасеевское и др., свидетельствует о том, что часть органического вещества уже израсходована на концентрирование золота и извлечение его из дисперсного состояния, в отличие от месторождений Мурунтау, Бендиги и других, где процентное содержание $C_{орг}$ в осадочных прослоях, как и содержание самого дисперсного золота в породах гораздо выше (до 14%).

Не последнюю роль играли радоновые эманации, образующиеся в результате распада урана, накопленного в процессе биосорбции, в условиях тектоно-магматической активизации. Радон поглощается органикой, концентрируется в пленочных водах, вызывая радиолиз воды, образуя при этом высокоактивные окислители, а при наличии хлора образует ионные комплексы, способные при взаимодействии разрушать существующие связи в металлоорганических формах золота. В лабораторных условиях нами доказан факт

разрушения связей в металлоорганических формах золота при фотолитическом воздействии на сильные окислители. Поскольку природные процессы радиолиза на порядок сильнее процессов фотолиза, будем считать, что именно они оказывали существенное воздействие при разрушении металлоорганических форм золота.

Таким образом, для локализации и проявления золоторудных месторождений необходимо присутствие следующих факторов: 1) наличие в древнем фундаменте и (или) бортах депрессии высоко золотоносного субстрата, являющегося источником для гипергенного разрушения золота, сорбируемого биотой в бассейнах седиментации; 2) существование в пределах исследуемой территории или поблизости древних осадочно-метаморфических комплексов, содержащих органические остатки или $C_{орг}$; 3) присутствие на площади рудного поля или поблизости от него магматического очага, являющегося энергетическим стимулятором мобилизации, перераспределения и концентрации золотоносного субстрата, а также генератором рудного процесса, поставляющего золото из глубинных рудно-магматических камер; 4) нахождение на площади рудного поля либо около него золоторудных объектов, сформированных в более ранние этапы рудообразования и выполняющих роль золотоносного субстрата, из которого извлекается и перераспределяется золото во время многоэтапного золотого оруденения; 5) наиболее перспективными в пределах депрессий и их обрамления следует считать площади тектонических блоков, воздымающихся на момент рудообразования (подъем блоков определяет наличие поступления радоновых эманаций, стимулирующих процессы разрушения металлоорганического золота); 6) наличие терригенных прослоев (как правило, мезозойского возраста), содержащих углистое вещество или растительные органические остатки, выступающие в виде сорбирующих экранирующих прослоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бактериальная палеонтология / под ред. А.Ю. Розанова. М.: ПИН РАН, 2002. 188 с.
2. Барабашева Е.Е. О роли биогеохимического рециклинга в образовании рудных месторождений / Е.Е. Барабашева / Вестник ЗабГК № 4, 2011. Чита: ЗабГК, 2011. С. 59–61.
3. Куимова Н.Г. Биогенная минерализация золота в природе и эксперименте. / Н.Г. Куимова, В.Г. Моисеенко. // Литосфера, 2006. № 3. С. 83–95.