

УДК 550:576.8:549.283(571.66)

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ МИКРООРГАНИЗМОВ В РАССЕЙНИИ И КОНЦЕНТРИРОВАНИИ ЗОЛОТА В ЖИРОВСКОМ ЗОЛОТО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА)

© 2003 г. Е. Д. Коробушкина, В. Д. Пампура, В. Р. Мамитко

Представлено академиком Ф.А. Летниковым 17.04.2002 г.

Поступило 19.09.2002 г.

Известно, что кальдерные микроорганизмы являются мощным фактором изменения среды [1–3]. Трансформируя вещества глубинного и поверхностного происхождения, они обеспечивают взаимосвязь геологических и биологических процессов [4]. По мнению Г.А.Карпова, формирование зон оруденения в кальдерах происходит на геохимических барьерах, где основную роль играют биогенные факторы. В вулканических гидротермах и биотопах, содержащих Fe^{2+} , S^0 , сульфидные минералы (с температурой от 40 до 98°C и pH от 1 до 6.5), широко распространены умеренно термофильные и облигатно-термофильные хемолитотрофные микроорганизмы [5]. При окислении сульфидных минералов цветные металлы и редкие элементы, а зачастую и благородные металлы выщелачиваются из руд. Воды, дренирующие рудные тела, содержат повышенные концентрации растворенного золота (0.2–16.5 мкг/л), что указывает на его способность к миграции. Электронно-микроскопические исследования показали, что растворенное золото адсорбируется клетками *Thiobacillus ferrooxidans*, при этом Au^{3+} восстанавливается до Au^0 и отмечается рост частичек золота [6]. Существенное влияние на его подвижность и концентрирование оказывают хемолитотрофные и органотрофные микроорганизмы [7, 8]. В зоне гипергенеза золоторудных месторождений содержание золота в биомассе микроорганизмов нередко достигает 70–150 г/т. Показано, что альго-бактериальные сообщества областей активного вулканизма могут способствовать образованию полей концентрирования золота и его укрупнению [9].

Цель настоящей работы – выявление роли микроорганизмов в рассеянии и концентрировании

золота современных вулканорудных систем с учетом их геохимической деятельности.

Микробиологические исследования проведены на Жировском золото-полиметаллическом месторождении, которое находится в пределах эрозионно-тектонической кальдеры в виде мощной рудной зоны. Жировская вулканоструктура составляет часть Мутновского геотермального поля [10]. Гипергенные процессы преобразования рудного тела рассмотрены нами на примере жилы “Определяющая”, мощность которой составляет 0.5–0.7 м. Нами установлено, что рудная жила характеризуется кварц-карбонат-полиметаллическим составом с повышенным содержанием золота от нескольких мг/т до 5.5 г/т, в гидротермальноизмененных околожильных породах от 0.064 до 0.536 г/т. Содержание серебра в околорудном пространстве жилы “Определяющая” варьирует от 0.12 до 100 г/т, мышьяка от 0.6 до 279 г/т, меди от 7.0 до 485 г/т. Минералами-концентраторами золота и его элементов-спутников являются кварц, сульфидные минералы (пирит, сфалерит, галенит, блеклые руды, сульфосоли серебра и др.). По данным сцинтилляционного эмиссионного спектрального анализа (ИГХ СО РАН), а также по наблюдениям на сканирующем электронном микроскопе BS-300 (Иркутский университет) выявлено, что золото коллоидное (от 30–50 до 1000 нм), тонкодисперсное, с преобладающим размером частиц 1–3, 3–5 и 5–9 мкм. Изучено распределение элементов в биомассе микроорганизмов природных объектов, в рудном материале, вмещающих породах разной степени изменения, минералах, водотоках и термальных источниках (с температурой от 10 до 97°C и pH от 1.0 до 8.0). Образцы для исследований отобраны на трех типичных для Мутновско-Жировской геотермальной системы объектах – субповерхностные термоявления Медвежье, Северо-Мутновское и Верхне-Мутновское в зоне гипергенеза в пределах рудного поля Жировской кальдеры. Общая минерализация высокотемпературных ги-

Институт геохимии им. А.П. Виноградова
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Иркутск

Таблица 1. Формирование зоны окисления Жировского золото-полиметаллического месторождения при участии микроорганизмов

Характер гипергенного материала	T, °C	Микроорганизмы и их сообщества	Ср. содержание в гипергенных минералах, г/т		
			Au	Ag	As
Зона окисления					
<i>Подзона выщелачивания</i>					
Оксиды и гидроксиды железа, марганца, сульфиды мышьяка и железа с коллоидной серой (глубина 0.0–0.5 м)	30–45	Thiobacillus thiooxidans, Thiobacillus ferrooxidans, Leptospirillum ferrooxidans, Thiobacillus denitrificans, Bacillus acidocaldarius, Metallogenium sp., Aspergillus fumigatus, Cephalosporium sp.	0.9	4.8	159
<i>Подзона вторичного золотого обогащения</i>					
Окисленные и полуокисленные сульфиды с опаловидным кварцем (глубина 0.5–0.8 м)	55–75	Acidianus sp., Sulfobacillus thermosulfidooxidans	4.6	7.8	69
Марганцевые прослои, скопления гипергенных сульфидов, S ⁰ , вторичных кварцитов и органического вещества (глубина 0.5–0.8 м)	60–85	Acidianus sp., Sulfofococcus sp., Thermothrix thiopara, Bacillus coagulans	5.5	8.6	81
Зона восстановления					
<i>Зона вторичного золото-сульфидного обогащения</i>					
Голубая глина с гипергенным пиритом (глубина 0.8–1.5 м)	55–80	Desulfovibrio thermophilus, Desulfurococcus sp.	4.0	19.6	148
Голубая глина с гипергенным пиритом и S ⁰ (глубина 0.8–1.5 м)		Desulfotomaculum sp., (Desulfurococcus sp.)	4.9	13.7	172
<i>Зона первичных руд</i>					
Кварц-сульфидная рудная жила “Определяющая” (глубина >1.5 м)	42–55	Sulfobacillus thermosulfidooxidans, Leptospirillum ferrooxidans	2.3	15.5	32

дротерм 0.5 г/л. Термальные воды имеют хлоридно-сульфатно-натриевый и азотно-углекислый состав. Основными гипергенными минералами являются оксиды и гидроксиды железа (гётит, гидрогётит, гематит, лимонит, скородит, оксиды и гидроксиды марганца, кристаллическая и коллоидная сера, вторичные кварциты, продукты выветривания полевых шпатов и др.). Методом прямого счета микроорганизмов обнаружены сотни миллионов клеток на 1 г руды или измененных пород. Исследования показали, что в разных геохимических средах в зоне гипергенеза распространены различные виды и сообщества микроорганизмов, играющие ключевую роль в современных процессах окисления сульфидных минералов, растворения золота и его концентрирования (табл. 1).

З о н а о к и с л е н и я. Интенсивное окисление руд и окolorудных пород прослеживается в интервале глубин от 0.0 до 0.8 м. Переработка окolorужильных пород, испытавших сернокислотное выщелачивание, обнаружена на расстоянии 5–6 м от рудного тела жилы “Определяющая”. Гипергенные преобразования рудных тел и пород в пер-

вую очередь связаны с окислением сульфидов. В табл. 1 представлены наиболее широко распространенные в вулканических гидротермах и рудном материале хемолитотрофные факультативно-термофильные зубактерии, экстремально термофильные архебактерии, а также тионовые бактерии, железобактерии и органотрофы, развивающиеся при температуре 30–45°C. Экспериментальные исследования показывают, что при окислении сульфидов рудного материала *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* при 45–55°C и pH 1.0–1.5 за 48–60 ч в раствор переходило до 2.5 мг/л золота, в контроле без бактерий не более 0.78 мг/л за тот же промежуток времени. Умеренно термофильные тиобациллы, близкие к *Thiobacillus ferrooxidans* и *Leptospirillum ferrooxidans*, при 30–45°C выщелачивали до 1.7 мг/л золота. При этом окислительно-восстановительный потенциал среды (*Еh*) возрастал и создавалась окислительная обстановка, а pH резко понижался. При бактериальном и химическом окислении руд золото интенсивно перераспределяется. Снижение содержания металла в рудах подзоны выщелачивания указывает на его миграцию (см. табл. 1). Это подтверждается и наличием растворенного золота от

Таблица 2. Устойчивость комплексов золота, образующихся при микробиологических и химических окислительных процессах

Тип окисления	Комплекс	Условия устойчивости комплексов			
		верхний предел		нижний предел	
		<i>Eh</i> , В	pH	<i>Eh</i> , В	pH
Химическое, микробиологическое с участием хемолитотрофных микроорганизмов	$[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]^{3-}$	0.8–0.6	0–9	0.8–0.4	0–10
Микробиологическое (продукты биосинтеза гетеротрофных микроорганизмов и окисления органических веществ)	Золотоорганические	0.7	5–9	(–0.2) –0.5	5–10

0.01 до 0.96 мг/л в водах, омывающих рудную жилу. Количество растворенного золота определяли атомно-абсорбционным методом (ИГХ СО РАН). Золото при этих значениях *Eh*–pH растворяется в виде тиосульфатных, галоидных и золотоорганических комплексов и переносится сульфатными и метеорными водами в нижние горизонты месторождения. Установлено, что золотоорганические комплексы по сравнению с тиосульфатными устойчивы в более широкой области *Eh*–pH (табл. 2). Во вмещающих породах жилы “Определяющая” содержание (г/т) Au составляет 0.94, Ag 1.72, As 71, Pb 87, Zn 205, в которых цианобактериальные маты при температуре от 10 до 45°C содержат коллоидное и растворенное золото в количестве 4.5–30 г/т. Сорбированное золото в клетках определяли с применением трассера радиоактивного изотопа ¹⁹⁵Au (ИГХ СО РАН). В подзоне выщелачивания выявлены умеренно термофильные спорообразующие бактерии *Bac. subtilis* и другие, продукты метаболизма которых в присутствии окислителей выщелачивают из окисленных руд и пород до 70–90% золота. В связи с этим происходит расширение ореолов рассеяния золота водами, обогащенными продуктами биосинтеза и окисления органических веществ.

Таблица 3. Аккумуляция золота микроорганизмами (концентрация растворенного золота 6.3 мг/л)

Культура	Содержание золота, % от внесенного, через интервалы времени			
	сорбированного клетками		в клетках после отмыва непрочно связанного золота	
	15 мин	60 мин	15 мин	60 мин
<i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i>	70.5	87.4	61.5	78.5
<i>Bacillus coagulans</i>	75.5	89.7	67.2	80.0
<i>Aspergillus niger</i>	93.8	99.9	78.5	87.8

Активную роль в создании геохимических барьеров ручья Рудного выполняют железобактерии *Galionella*, *Metallogenium* sp., *Siderococcus limoniticus*. Обнаружены скопления свежесозданного геля, содержащего гидроксиды железа и марганца, который концентрирует 73.2 г/т золота. Свежесозданный гель оксидов на поверхности клеток железобактерий является центром кристаллизации “нового” золота. Выявлена аккумуляция золота в клетках микроорганизмов различных физиологических групп (табл. 3). Как видно из приведенных данных, основная часть Au^{3+} поглощается клетками, причем непрочно связанное золото не превышает 10–12% (см. табл. 3). Коллоидные и тонкодисперсные частицы мигрируют с клетками, перемещаясь с метеорными водами по глубине зоны окисления и скапливаясь в карстовых пустотах, трещинах на рудном материале, образуя сгустки обогащенной золотом биомассы. В экспериментах при культивировании водорослево-бактериальных сообществ с растворенным золотом (6.3 мг/л) обнаружены волосовидные, губчатые, гетероморфные, натечные, кристаллические формы сростков тонких пластинок золота.

Зона восстановления. Ниже зоны окисления (0.8–1.5 м) при значительном дефиците кислорода создаются благоприятные условия для жизнедеятельности анаэробных сульфатредуцирующих бактерий (см. табл. 1), которые изменяют физико-химическую обстановку. Под действием этих бактерий, образующих биогенный сероводород, происходит взаимодействие его с сульфатами меди, железа и других металлов с образованием вторичных сульфидов. Тиосульфатные и золотоорганические комплексы здесь разрушаются, золото восстанавливается и соосаждается с вторичными сульфидами, образуя зону вторичного золото-сульфидного обогащения.

Таким образом, микроорганизмы Жировского золото-полиметаллического месторождения современных вулканорудных систем играют важную роль в процессе интенсивного окисления сульфидных минералов. Показано, что факультативно термофильные зубактерии, умеренно тер-

мофильные тиобациллы и органотрофные бактерии выщелачивают золото из рудного материала, что способствует его рассеянию. В природных условиях наряду с рассеянием золота идет активная аккумуляция растворенного, коллоидного и тонкодисперсного золота из рудничных вод и рудного материала разными физиологическими группами микроорганизмов. Значительная часть золота связана с клетками, что позволяет говорить о существенной роли микроорганизмов в концентрировании металла. При этом золото интенсивно перераспределяется с образованием подзоны золотого обогащения в приповерхностной части зоны окисления и зоны вторичного золото-сульфидного обогащения.

Авторы признательны члену-корреспонденту РАН Г.И. Каравайко за оказанную помощь в подготовке сообщения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 96-05-64819).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Заварзин Г.И.* Литотрофные микроорганизмы. М.: Наука, 1972. 323 с.
2. *Brock T.D.* Thermophilic Microorganisms and Life at High Temperatures. N.Y.: Springer, 1978. 465 p.
3. *Каравайко Г.И., Головачева Р.С.* В кн.: Биология термофильных микроорганизмов. М.: Наука, 1980. С. 35–47.
4. *Заварзин Г.А., Карпов Г.А.* // ДАН. 1982. Т. 214. № 1. С. 244–247.
5. *Заварзин Г.А., Карпов Г.А., Горленко В.М. и др.* Кальдерные микроорганизмы. М.: Наука, 1989. 120 с.
6. *Пивоварова Т.А., Коробушкина Е.Д., Крашениникова С.А. и др.* // Микробиология. 1986. Т. 55. В. 6. С. 966–972.
7. *Коробушкина Е.Д., Каравайко Г.И., Коробушкин И.М.* В сб.: Биогеотехнология металлов: Тр. Междунар. сем. и Междунар. учебных курсов. М.: Центр. Междунар. проектов ГКНТ, 1985. С. 130–144.
8. *Коробушкина Е.Д., Китаев Н.А., Коробушкин И.М.* Тез. докл. IV объед. Междунар. симпоз. по проблемам прикл. геохимии, посв. памяти Л.В. Таусона. Иркутск, 1994. Т. 1. С. 185–186.
9. *Коробушкина Е.Д., Королева Г.П.* // ДАН. 1989. Т. 308. № 1. С. 167–171.
10. Геотермальные и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1986. С. 41–63.