

УДК 579.8.017

ОКИСЛЕНИЕ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ СУБСТРАТОВ АБОРИГЕННЫМ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО СОЗДАННЫМ СООБЩЕСТВАМИ МИКРООРГАНИЗМОВ

© 2012 г. Т. А. Пивоварова*, А. Г. Булаев*, П. В. Рощупко*, А. В. Белый**, Т. Ф. Кондратьева*

*Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН, Москва, 117312

e-mail: Kondr@inmi.ru

**ЗАО “Полюс”, Красноярск

Поступила в редакцию 26.01.2012 г.

Исследовано аборигенное и экспериментальное сообщество ацидофильных хемолитотрофов, созданное на основе чистых культур микроорганизмов. Наблюдали окисление элементной серы, тиосульфата натрия и тетрагидрата калия в качестве единственных источников энергии. У экспериментального сообщества окисление протекало с большей скоростью, чем у аборигенного сообщества, выделенного из флотоконцентрата пирротинсодержащей пиритно-арсенопиритной золотомышьяковой сульфидной руды. Степень окисления S-субстратов экспериментальным сообществом микроорганизмов составила 17.91, 68.30 и 93.94%, аборигенным сообществом – 10.71, 56.03 и 79.50% соответственно. Степень окисления сульфидных форм серы в флотоконцентрате руды аборигенным сообществом микроорганизмов составила 59.15%, а экспериментальным сообществом микроорганизмов – 49.40%. Несмотря на более высокую скорость окисления S-субстратов в качестве единственных источников энергии экспериментальным сообществом микроорганизмов, аборигенное сообщество с большей скоростью окисляло S-субстраты во флотоконцентрате пирротинсодержащей пиритно-арсенопиритной золотомышьяковой сульфидной руды, из которого оно было выделено. Из сульфидных минералов в процессе бактериально-химического окисления флотоконцентрата аборигенным сообществом микроорганизмов извлечено дополнительно 32.3% золота, что на 5.7% больше, чем в случае применения экспериментального сообщества микроорганизмов.

Важнейшим фактором среды, влияющим на видовое разнообразие сообществ ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов (АХМ), как в природных условиях, так и в биогеотехнологических процессах окисления сульфидного минерального сырья, является характеристика энергетического субстрата [1].

Одним из кислоторастворимых сульфидных минералов, входящих в состав сульфидных руд, является пирротин. В кислых условиях пирротин растворяется с потреблением протонов, что приводит к нежелательному повышению pH. При этом в среду выделяется большое количество ионов двухвалентного железа, которое, с одной стороны, является субстратом для микроорганизмов, но, с другой стороны, снижает окислительно-восстановительный потенциал среды, что может замедлять процесс окисления сульфидов. Из сульфидной серы пирротина через сероводород и полисульфиды образуется элементная сера [2].

Самым распространенным кислотонерастворимым сульфидным минералом на Земле является пирит, который входит в состав большинства сульфидных руд. Его окисление микроорганизмами идет по пути, который основан на окислительной атаке Fe^{3+} . Здесь главным промежуточ-

ным соединением является тиосульфат [3]. При низких значениях pH химическое окисление пирита контролируется Fe^{3+} -ионами, а не кислородом, так как гидратированные ионы Fe^{3+} , в отличие от растворенного кислорода, связываются с поверхностью пирита. Это приводит к переносу электронов от атомов серы кристаллической решетки на ионы железа Fe^{3+} [4]. В цикле бактериально-химического окисления пирита образуются три-, тетра- и пентатионаты.

Генетическая гетерогенность техногенных сообществ АХМ позволяет адаптироваться к изменениям характеристик энергетического субстрата, т.е. к изменениям соотношения сульфидных минералов и химических элементов во флотоконцентратах сульфидных руд. Однако при высоком содержании в окисляемом субстрате пирротина (и в меньшей степени арсенопирита) происходит накопление избытка элементной серы, которую микроорганизмы часто не успевают полностью окислить [5]. Поэтому одной из проблем извлечения золота при биоокислении таких субстратов является высокое содержание в твердых остатках (биокеки) большого количества серы, которая обладает высокой сорбционной активностью по отношению к цианиду [6]. Сера значительно по-

вышает расход цианида и снижает извлечение благородных металлов, что приводит к необходимости вводить в технологию дополнительные этапы для доокисления серы перед цианированием (обработку биокеков кислородом, окисление при 50–90°C азотной кислотой, электрохимическую обработку и т.д.) [5, 7]. Кроме того, осаждение гидрофобной серы на поверхности сульфидных минералов препятствует процессу их дальнейшего биоокисления [8]. Поэтому присутствие в минеральном концентрате большого количества пирротина, считающегося легкоокисляемым, представляет собой большую проблему в биогидрометаллургии благородных металлов.

Так как многие технологические приемы обработки биокеков перед цианированием значительно увеличивают затраты, то одной из важнейших задач биогидрометаллургии является снижение содержания в них серы путем оптимизации процесса биоокисления.

Одним из возможных путей может являться использование термофильных архей, с большой скоростью окисляющих серу. При ведении процесса биоокисления термофильными микроорганизмами (*Sulfolobus metallicus*) происходит снижение содержания серы в биокеке, однако данные микроорганизмы более чувствительны по сравнению с мезофильными к мышьяку, поэтому не подходят для переработки концентратов, содержащих арсенопирит [9, 10]. Необходимо искать пути оптимизации процессов биоокисления таких субстратов, протекающих в мезофильных условиях.

Цель работы – изучение скорости окисления аборигенным и экспериментально созданным сообществами ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов S-субстратов (S^0 , тиосульфат и тетрагидрат) как единственных источников энергии в среде и сульфидных форм серы во флотоконцентрате золотомышьяковой пирротинсодержащей пиритно-арсенопиритной руды.

МЕТОДИКА

Сообщества микроорганизмов и условия выращивания. Аборигенное сообщество ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов было создано на основе накопительной культуры, полученной при внесении в 100 мл среды Сильвермана и Люндгрена 9К [11] с 1 г/л элементной серы, 2 г навесок флотоконцентрата пирротинсодержащей пиритно-арсенопиритной золотомышьяковой сульфидной руды. Исходный pH среды довели до 5 М H_2SO_4 до 2.0. Колбы помещали на качалку со 150 об/мин в термостат при 35–37°C. В состав сообщества аборигенных микроорганизмов были включены также бактерии и археи, выделенные ранее из флотоконцентратов той же руды: *Acidithiobacillus ferrooxidans* OL10-01, *Leptospirillum*

ferriphilum OL10-02, *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* OL10-03, *Ferroplasma acidiphilum* OL-4, *Alicyclobacillus tolerans* OL10-05 [12].

В состав экспериментального сообщества микроорганизмов были включены, помимо вышеперечисленных бактерий и архей, следующие штаммы микроорганизмов, хранящиеся в музее чистых культур лаборатории хемолитотрофных микроорганизмов ИНМИ РАН: *S. olympiadicus* OL-6; *S. thermosulfidooxidans* OL-7; *S. thermosulfidooxidans* (штаммы Ser, P, M); *L. ferriphilum* (штаммы, выделенные из руд Кючусского и Олимпиадинского месторождений); *F. acidiphilum* – флотоконцентрата руды Кючусского месторождения; штамм *A. thiooxidans* N (Армения); штамм *A. caldus* R; штамм *S. thermosulfidooxidans* HT-3.

Сообщества микроорганизмов поддерживали на среде с флотоконцентратом при 5%-ной плотности, пересевая 1 раз в месяц.

Окисление S-субстратов (S^0 , $S_2O_3^{2-}$, $S_4O_6^{2-}$) сообществами микроорганизмов. Опыты проводили в колбах Эрленмейера объемом 250 мл со 100 мл среды [11] без добавления двухвалентного железа. В среду в качестве единственного источника энергии добавляли стерильные субстраты: элементную серу в количестве 10 г/л, или тиосульфат натрия ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) в количестве 3 г/л, или тетрагидрат калия ($K_2S_4O_6$) в количестве 3 г/л. Серу стерилизовали автоклавированием при 0.5 атм, 3%-ные растворы тиосульфата натрия или тетрагидрата калия в минеральной среде стерилизовали фильтрованием через мембранный фильтр с диаметром пор 0.22 мкм. Значение pH среды довели до 5М H_2SO_4 до 2.5. В качестве инокулята использовали уравненные по числу клеток суспензии сообществ микроорганизмов. Колбы помещали на качалку со 150 об/мин, выращивание проводили при 35–37°C. Контрольные эксперименты проводили в колбах со стерильной средой и серными субстратами, не инокулируя их микроорганизмами.

Окисление флотоконцентрата. В состав флотоконцентрата входило (%) Fe_S – 20.37, $S_{общ}$ – 18.33, S_S – 17.84, $S_{эл}$ – 0.8, As_S – 6.69, $Ca_{общ}$ – 4.97 и $C_{общ}$ – 3.58. Окисление флотоконцентрата проводили в полунепрерывных условиях культивирования в отъемно-доливном режиме в трех биореакторах объемом 2500 мл с 600 мл среды [11] без двухвалентного железа в каждом, при плотности пульпы (суспензии концентрата руды в жидкой среде) 16.6%, исходном значении pH 1.9–2.0, температуре 35–37°C, перемешивании верхнеприводной мешалкой (“RW20 digital IKA”, Германия) при скорости вращения 430 об/мин и скорости протока 0.004 ч⁻¹.

Методы анализа. Значения pH определяли на pH-метр-иономере Эксперт-001 (“Эконикс-Экс-

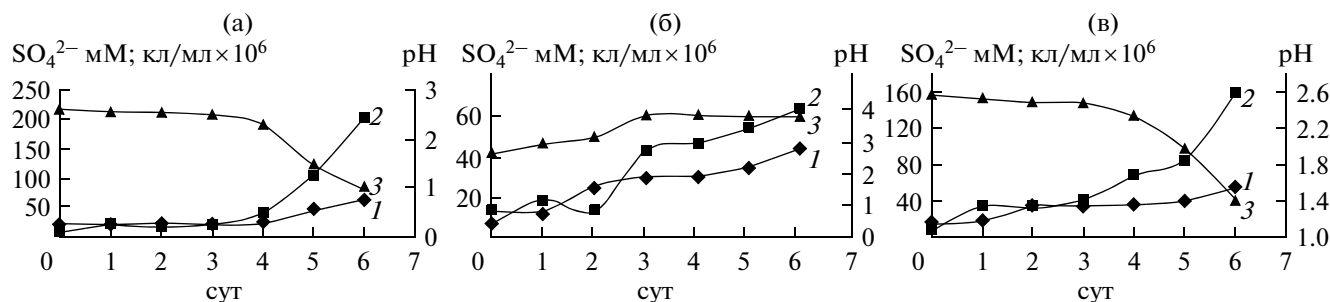


Рис. 1. Окисление аборигенным сообществом микроорганизмов элементарной серы (а), тиосульфата натрия (б), тетра-тионата калия (в).

1 – SO_4^{2-} (мМ), 2 – число клеток ($\text{кЛ/мл} \times 10^6$), 3 – значение pH.

перг”, Россия), Eh – на Microprocessor pH Meter pH 213 (“Hanna”, Германия), количество SO_4^{2-} – по методу [13], число клеток – методом прямого счета в световом микроскопе Ampival (“Carl Zeiss”, Германия) с фазово-контрастной приставкой.

Количественный анализ элементного состава флотоконцентрата проводили в аналитической лаборатории Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных и благородных металлов (ЦНИГРИ) по методикам исполнителя. Содержание золота и серебра в твердых остатках биоокисления (биокеках) определяли пробирным анализом. Степень извлечения золота – сорбционным цианированием биокеков. Цианирование проводили в следующих условиях: плотность пульпы – 30% (в/о), pH 10.2–10.5, 1.0 г/л цианида натрия (70% времени), продувание воздухом 25 л/ч, 8% сорбента (carbon Norit 3515), 20°C в течение 48 ч. Уровень адсорбции золота на сорбенте 99–100%.

Определение степени окисления S-субстратов.

Для определения степени окисления S-субстратов сообществами микроорганизмов в качестве единственных источников энергии было рассчитано возможное количество SO_4^{2-} , образованного при их полном окислении. Из 10 г S^0 может быть образовано 312.5 мМ SO_4^{2-} . Из 3 г $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 0.774 г S^0 , что соответствует 24.2 мМ SO_4^{2-} . Из 3 г $\text{K}_2\text{S}_4\text{O}_6$ – 1.27 г S^0 , что соответствует 39.7 мМ SO_4^{2-} . Исходя из расчетов, с минеральными солями в среду было внесено 24.7 мМ SO_4^{2-} . Таким образом, в опытах с S^0 в результате полного окисления могло образоваться 337.2 мМ SO_4^{2-} , с $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 48.9 мМ SO_4^{2-} , с $\text{K}_2\text{S}_4\text{O}_6$ – 64.4 мМ SO_4^{2-} .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Окисление S-субстратов в качестве единственных источников энергии. При инкубировании сте-

рильных контрольных колб в течение 8 сут не наблюдалось накопления в среде сульфатов, что свидетельствовало о том, что использованные серные субстраты практически не окислялись кислородом воздуха без участия микроорганизмов.

При окислении элементарной серы аборигенным сообществом микроорганизмов число клеток в 1 сут роста увеличилось от 0.65×10^7 до 2.04×10^7 , логарифмическая фаза наступила только после 4 сут, и к 6 сут число клеток достигло 20.35×10^7 (рис. 1а). Снижение значения pH коррелировало с ростом клеток и окислением серы. За период наблюдения значение pH снизилось от 2.59 до 0.98, в среде накопилось 58.1 мМ SO_4^{2-} .

Тиосульфат является одним из основных продуктов, образующихся при окислении пирита [2]. Он нестабилен в кислой среде, при pH ниже 4.0 разлагается на сульфит и серу. При взаимодействии с серной кислотой из тиосульфата образуется сульфат и серноватистая кислота ($\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_3$), которая разлагается с образованием SO_2 , S^0 и H_2O . В контрольном эксперименте без инокулята pH стерильной среды за 6 сут повышался от 2.65 до 3.44–3.52.

При окислении тиосульфата натрия аборигенным сообществом микроорганизмов число клеток в 1 сут роста увеличилось от 0.65×10^7 до 1.85×10^7 (рис. 1б). При этом количество SO_4^{2-} в среде осталось без изменений. Возможно, этот прирост биомассы был обязан гетеротрофной составляющей сообщества за счет использования органического вещества, внесенного с инокулятом. Затем с увеличением значения pH число клеток снизилось, а после 2 сут опять начало увеличиваться, однако достигло через 6 сут только 6.29×10^7 . Вторая логарифмическая фаза, возможно, была связана с изменениями в соотношении микроорганизмов в сообществе, в пользу более устойчивых к повышению значения pH, которое через 6 сут

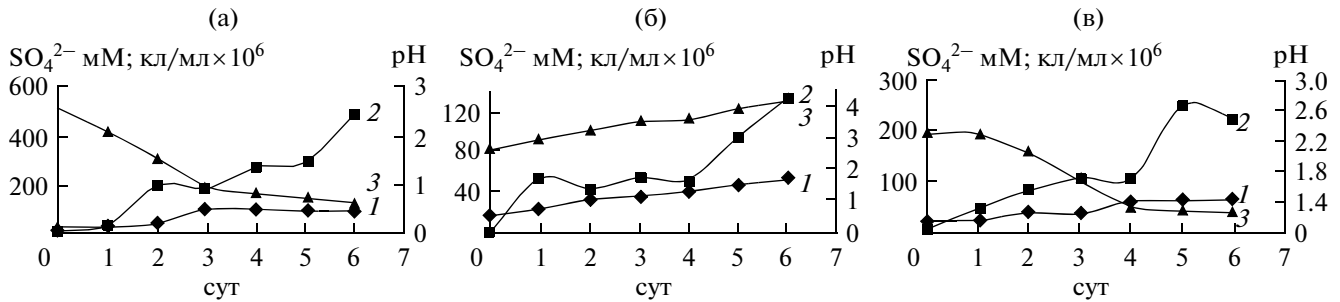
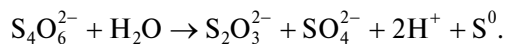


Рис. 2. Окисление экспериментальным сообществом микроорганизмов элементарной серы (а), тиосульфата натрия (б), тетрагидрата калия (в).

1 – SO_4^{2-} (мМ), 2 – число клеток (кл./мл $\times 10^6$), 3 – значение pH.

возросло от 2.65 до 3.86. В среде за это время накопилось 40.9 мМ SO_4^{2-} .

Метаболизм тетрагидрата калия идет через гидролиз с образованием серы, тиосульфата и сульфата:



При окислении тетрагидрата калия аборигенным сообществом микроорганизмов число клеток в 1 сут роста увеличилось от 0.65×10^7 до 3.33×10^7 , достигая через 6 сут 15.91×10^7 (рис. 1в). Значение pH при этом снизилось от 2.58 до 1.41. Особенно интенсивное снижение pH среды наблюдали после 4 сут роста, когда шло интенсивное увеличение числа клеток. В среде накопилось за 6 сут 51.2 мМ SO_4^{2-} .

Как видно из рис. 1а–1в, в первые 4 сут роста на среде с тетрагидратом было более высокое число клеток, чем на средах с элементарной серой и тиосульфатом в качестве источников энергии, и накапливалось больше SO_4^{2-} . Через 5 сут роста аборигенное сообщество микроорганизмов на среде с элементарной серой перегнало по числу клеток сообщество на среде с тетрагидратом. При этом наблюдалось более активное снижение pH до 1.46 и 1.97 и большая скорость накопления SO_4^{2-} : 41.5 и 37.7 мМ соответственно. Рост на среде с тиосульфатом был существенно хуже, чем на двух других субстратах, при этом наблюдалось повышение значения pH от 2.65 до 3.82 и меньшее накопление SO_4^{2-} – 33.0 мМ.

При окислении элементарной серы экспериментальным сообществом микроорганизмов число клеток в первые сутки роста увеличилось от 0.65×10^7 до 3.33×10^7 (рис. 2а). Однако экспериментальному сообществу микроорганизмов не потребовалось длительной лаг-фазы, в отличие от аборигенного, для окисления элементарной серы. После 1 сут была отмечена первая логарифмическая фаза. После 2 сут наблюдали снижение скорости роста, возможно, из-за значения pH, неоптимального для

микроорганизмов, доминирующих в сообществе в первые 2 сут роста. В сообществе микроорганизмов в этот период происходило замещение доминирующих видов, устойчивых к низким значениям pH, который при этом снизился от 2.62 до 0.75. После 5 сут наступила вторая лог-фаза. И число клеток достигло 51.62×10^7 . На 3 сут эксперимента в среде накопилось 96.1 мМ SO_4^{2-} .

При окислении тиосульфата натрия экспериментальным сообществом микроорганизмов число клеток в первые сутки роста увеличилось больше, чем на других S-субстратах, от 0.65×10^7 до 5.36×10^7 (рис. 2б). В период 1–4 сут по мере повышения pH скорость роста снижалась. Однако после 4 сут число клеток резко возросло, и на 6 сут составило 13.32×10^7 . В экспериментальном сообществе микроорганизмов, более богатом по разнообразию включенных в его состав бактерий и архей, чем аборигенное сообщество, присутствуют штаммы, которые даже при увеличении pH после периода адаптации начинают активно размножаться за счет органических соединений, накопленных в среде в результате лизиса клеток ацидофильных микроорганизмов, неустойчивых к значению pH выше 3.0. При этом окисление тиосульфата продолжалось с низкой скоростью, но немного более высокой, чем в процессе с аборигенным сообществом микроорганизмов: в среде через 6 сут роста накопилось 48.4 мМ SO_4^{2-} .

При окислении тетрагидрата калия экспериментальным сообществом микроорганизмов число клеток в 1 сут роста увеличилось от 0.65×10^7 до 4.81×10^7 , достигая через 5 сут 24.98×10^7 (рис. 2в). После 3 сут культура переходила в стационарную фазу роста, значение pH при этом продолжало снижаться, содержание SO_4^{2-} возросло: в отсутствие прироста клеток процесс окисления продолжался. После 4 сут наблюдалась вторая логарифмическая фаза, которая при низких значениях pH не была связана с окислением тетрагидрата, так

Таблица 1. Степень окисления S-субстратов двумя сообществами микроорганизмов, %

S-субстрат	Сообщество микроорганизмов, %	
	аборигенное	экспериментальное
S ⁰	10.71	17.91
S ₂ O ₃ ²⁻	56.03	68.30
S ₄ O ₆ ²⁻	79.50	93.94

как количество SO₄²⁻ в среде в это время оставалось на одном уровне. В экспериментальном сообществе микроорганизмов более широко представлены миксотрофные сульфобациллы, чем в аборигенном сообществе. Возможно, вторичная логарифмическая фаза вызвана вспышкой роста этих микроорганизмов за счет использования в качестве энергетических субстратов органических веществ. В среде к концу эксперимента накопилось 60.5 мМ SO₄²⁻.

В 1 сут роста наибольшее число клеток у экспериментального сообщества наблюдалось на среде с тиосульфатом, однако уже на 2 сут экспериментальное сообщество на среде с элементарной серой значительно перегнало по числу клеток сообщество микроорганизмов на среде с тиосульфатом и тетрагидратом (рис. 1, рис. 2). Отставание в росте на среде с тиосульфатом сохранялось до конца эксперимента, возможно, как и в случае с аборигенным сообществом микроорганизмов, из-за неблагоприятного для ацидофилов значения pH.

Скорость окисления S-субстратов экспериментальным сообществом микроорганизмов превышала скорость окисления аборигенным сообществом микроорганизмов. По числу клеток в процессе окисления элементарной серы через 6 сут роста экспериментальное сообщество микроорганизмов превосходило аборигенное сообщество: 51.62×10^7 и 20.35×10^7 соответственно. Значение pH при этом достигало 0.64 и 0.98 соответственно. В культуральной жидкости при окислении S-суб-

стратов экспериментальным сообществом микроорганизмов через 6 сут была отмечена более высокая концентрация SO₄²⁻, чем при окислении аборигенным сообществом микроорганизмов.

Степень окисления S-субстратов двумя сообществами микроорганизмов приведена в табл. 1. Экспериментальное сообщество микроорганизмов с большей скоростью в лабораторных экспериментах окисляло S-субстраты, чем аборигенное: элементарную серу – на 7.2, тиосульфат натрия – на 12.27, тетрагидрат калия – на 14.4%. Относительно низкая степень окисления элементарной серы объясняется ее избыточным внесением в среду. Из двух других S-субстратов с большей скоростью оба сообщества микроорганизмов окисляли тетрагидрат калия.

Окисление S-субстратов в флотоконцентрате золотомышьяковой сульфидной руды. В табл. 2 приведены результаты по степени окисления железа, мышьяка и серы, а также по извлечению золота и серебра в результате биоокисления двумя сообществами микроорганизмов флотоконцентрата пирротинсодержащей пиритно-арсенипиритной золотомышьяковой сульфидной руды. Степень окисления сульфидной формы серы аборигенным сообществом микроорганизмов составила 59.15, экспериментальным сообществом микроорганизмов – 49.40%.

Пробирным анализом в исходном флотоконцентрате определено 75 г/т золота и 1.6 г/т серебра. В результате цианирования исходного флотоконцентрата в хвостах (твердые остатки) цианирования определено 28.5 г/т золота и около 1 г/т серебра. В исходном флотоконцентрате содержится 62.0% свободного золота.

В результате цианирования биокека (выход 68%) из процесса биоокисления флотоконцентрата экспериментальным сообществом микроорганизмов в хвостах цианирования определено 12.6 г/т золота и менее 1 г/т серебра. В процессе цианирования окисленного флотоконцентрата было извлечено 88.6% золота и более 62.5% серебра. Из сульфидных минералов в процессе бактериально-химического окисления флотоконцен-

Таблица 2. Степень окисления сульфидных элементов и извлечения благородных металлов двумя сообществами микроорганизмов из концентрата золотомышьяковой сульфидной руды в последних реакторах лабораторной установки

Субстрат	Содержание, %						Степень окисления, %			Извлечение, %	
	Fe _S	As _S	S _{общ}	S ⁰	S _{сульфатн.}	S _S	Fe _S	As _S	S _S	Au	Ag
Исходный концентрат	20.37	6.69	18.33	0.8	0	17.84				62.0	<62.50
Биокек после окисления экспериментальным сообществом	12.30	2.90	17.51	1.97	2.26	13.28	58.94	70.53	49.40	88.60	>62.50
Биокек после окисления аборигенным сообществом	9.22	0.70	15.98	2.21	4.66	9.11	63.79	91.63	59.15	94.3	>62.50

трата экспериментальным сообществом микроорганизмов высвобождено дополнительно 26.6% золота.

В результате цианирования биокека (выход 80%) из процесса биоокисления флотоконцентрата аборигенным сообществом микроорганизмов в хвостах цианирования определено 5.32 г/т золота и менее 1 г/т серебра. В процессе цианирования окисленного флотоконцентрата было извлечено 94.3% золота и более 62.5% серебра. Из сульфидных минералов в процессе бактериально-химического окисления флотоконцентрата аборигенным сообществом микроорганизмов высвобождено дополнительно 32.3% золота, что на 5.7% больше, чем в случае применения экспериментального сообщества микроорганизмов.

Таким образом, несмотря на более высокую скорость окисления содержащих серу субстратов в качестве единственных источников энергии экспериментальным сообществом микроорганизмов, аборигенное сообщество как более адаптированное к субстрату, из которого оно было выделено, с большей скоростью окисляло S-субстраты концентрата пирротинсодержащей пиритно-арсенопиритной золотомышьяковой сульфидной руды.

Работа выполнена при поддержке ЗАО "Полюс".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьева Т.Ф., Пивоварова Т.А., Цаплина И.А., Фомченко Н.В., Журавлева А.Е., Муравьев М.И., Меламуд В.С., Булаев А.Г. // Микробиология. 2012. Т. 81. № 1. С. 3–28.
2. Shippers A., Sand W. // Appl. Environ. Microbiol. 1999. V. 65. № 1. P. 319–321.
3. Shippers A., Jozsa P.G., Sand W. // Appl. Environ. Microbiol. 1996. V. 62. № 9. P. 3424–3431.
4. Sand W., Gehrke T., Jozsa P.-G., Schippers A. // Hydrometallurgy. 2001. V. 59. № 2–3. P. 159–175.
5. van Aswegen P.C., van Niekerk J., Olivier W. // Biominning / Eds. D.E. Rawlings, B.D. Johnson. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. P. 1–35.
6. Luthy R.G., Bruce S.G.Jr. // Environ. Sci. Technol. 1979. V. 13. № 12. P. 1481–1487.
7. Sedelnikova G.V., Savari E.E. // Proc. 15th Int. Biohydrometallurgy Sympos. (IBS 2003). Part I / Eds: M. Tsezos, E. Remoudaki, A. Hatzikioseyan. Athens: Nat. Techn. Univ. Athens, 2003. P. 91–100.
8. Thomas J.E., Jones C.F., Skinner W.M., Smart R.St.C. // Geochimica et Cosmochimica. 1998. V. 62. № 9. P. 1555–1565.
9. Lindstrom E.B., Gunneriusson L. // J Ind. Microbiol. 1990. V. 5. № 6. P. 375–382.
10. Lindstrom E.B., Sandstrom A., Sundkvist J.-E. // Hydrometallurgy. 2003. V. 71. № 1–2. P. 21–30.
11. Silverman M.P., Lundgren D.C. // J. Bacteriol. 1959. V. 77. № 5. P. 642–647.
12. Булаев А.Г., Пивоварова Т.А., Меламуд В.С., Бумажкин Б.К., Патутина Е.О., Колганова Т.В., Кузнецов Б.Б., Кондратьева Т.Ф. // Микробиология. 2011. Т. 80. № 6. С. 854–861.
13. Kolmert Å., Wikström P., Hallberg K.B. // J. Microbiol. Methods. 2000. V. 41. № 3. P. 179–184.

Oxidation of Sulfur-Containing Substrates by Aboriginal and Experimentally Designed Microbial Communities

T. A. Pivovarova^a, A. G. Bulaev^a, P. V. Roshchupko^a, A. V. Belyi^b, and T. F. Kondrat'eva^a

^a Winogradsky Institute of Microbiology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

e-mail: Kondr@inmi.host.ru

^b ZAO Polyus, Krasnoyarsk, Russia

Received January 26, 2012

Abstract—Aboriginal and experimental (constructed of pure microbial cultures) communities of acidophilic chemolithotrophs have been studied. The oxidation of elemental sulfur, sodium thiosulfate, and potassium tetrathionate as sole sources of energy has been monitored. The oxidation rate of the experimental community is higher as compared to the aboriginal community isolated from a flotation concentrate of pyrrhotine-containing pyrite–arsenopyrite gold–arsenic sulfide ore. The degree of oxidation of the mentioned S substrates amounts to 17.91, 68.30, and 93.94% for the experimental microbial community and to 10.71, 56.03, and 79.50% for the aboriginal community, respectively. The degree of oxidation of sulfur sulfide forms in the ore flotation concentrate is 59.15% by the aboriginal microbial community and 49.40% by the experimental microbial community. Despite a higher rate of oxidation of S substrates as a sole source of energy by the experimental microbial community, the aboriginal community oxidizes S substrates at a higher rate in the flotation concentrate of pyrrhotine-containing pyrite–arsenopyrite gold–arsenic sulfide ore, from which it was isolated. Bacterial–chemical oxidation of the flotation concentrate by the aboriginal microbial community allows for the extraction of an additional 32.3% of gold from sulfide minerals, which is by 5.7% larger compared to the yield obtained by the experimental microbial community.