

УДК 579.846.2.017.7

## ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ МЕДНОЙ РУДЫ УДОКАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ АССОЦИАЦИЕЙ АЦИДОФИЛЬНЫХ ХЕМОЛИТОТРОФНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

© 2011 г. Т. Ф. Кондратьева\*, Т. А. Пивоварова\*, Л. Н. Крылова\*\*, В. С. Меламуд\*,  
Э. В. Адамов\*\*, Г. И. Каравайко\*

\*Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН, Москва 117312  
e-mail: kondr@inmi.host.ru

\*\*Московский институт стали и сплавов, Москва 119049  
e-mail: krulov@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.01.2011 г.

Из сульфидно-окисленной медной руды Удоканского месторождения выделены чистые культуры штаммов аборигенных микроорганизмов, идентифицированных, как *Acidithiobacillus ferrooxidans* TFUd, *Leptospirillum ferrooxidans* LUd, *Sulfobacillus thermotolerans* SUd. Изучены режимы химического и бактериального выщелачивания руды в диапазоне температур от  $-10$  до  $+20^{\circ}\text{C}$ . Показано влияние на извлечение меди кислотности раствора, температуры и присутствия микроорганизмов. Бактериальное выщелачивание наблюдалось только при положительных значениях температуры, при  $20^{\circ}\text{C}$  намного активнее, чем при  $4^{\circ}\text{C}$ . Процесс шел интенсивнее при более высоком содержании в руде водорастворимых и окисленных минералов. Показана возможность выщелачивания медных руд Удоканского месторождения растворами серной кислоты с pH 0.4 при отрицательных значениях температуры и с применением ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов при положительных значениях температуры и низких значениях pH.

Большая часть исследований процессов выщелачивания цветных металлов проведена на медьсодержащих субстратах [1]. С конца 80-х и начала 90-х годов XX века основным направлением технического прогресса в области переработки низкосортных, окисленных, труднообогащаемых медных руд являлась разработка и применение технологии кучного выщелачивания, когда руда располагается правильными слоями на специально подготовленных площадках, образуя кучи, или выщелачивания в отвалах, формирующихся при добыче руды, с использованием ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов [2]. Было установлено, что кинетика окисления вторичных сульфидных и окисленных медных минералов значительно повышается при бактериальном выщелачивании по сравнению с обработкой серной кислотой и сернокислыми растворами окисного железа [3–5]. Халькопирит (основной медный минерал в медных рудах) – наиболее трудноокисляемый минерал при выщелачивании. Окисленные медные и вторичные сульфидные минералы, халькозин и ковеллин, более легко поддаются выщелачиванию. Извлечение меди из окисленных минералов может достигать 70–90% в течение нескольких недель или месяцев. Извлечение меди из сульфидных минералов обычно длится дольше и достигает меньшего значения.

Технология кучного бактериально-химического окисления испытана на большом количестве типов сульфидных руд и концентратов, содержа-

щих цветные металлы. Примером организации такого процесса бактериального выщелачивания в России является выщелачивание бедных медно-цинковых руд на Николаевском руднике и выщелачивание меди из бедных окисленных отвалов на Коунрадском руднике [2].

Промышленное использование технологий бактериального выщелачивания применяется в основном для бедных медных руд и продуктов их переработки в странах с теплым климатом – Чили, Перу, Австралии, Мексике и др.

Удоканское месторождение, которое является самым крупным неосвоенным месторождением меди в России, находится в Читинской области в районе вечной мерзлоты с холодной продолжительной зимой при отрицательной среднегодовой температуре воздуха.

Цель работы – исследование возможности применения бактериально-химического выщелачивания меди из сульфидно-окисленных руд Удоканского месторождения при пониженных температурах.

### МЕТОДИКА

**Объекты исследования.** Объектами исследований являлись 3 пробы медной руды Удоканского месторождения, различающиеся по минеральному и химическому составу. В пробе № 1 руды содержится 1.82% меди, из которой 1.05% – в сульфидах (табл. 1). Медная минерализация представлена

**Таблица 1.** Содержание меди в минеральных фазах проб Удоканской медной руды

№ пробы руды	Содержание меди в руде, %				Степень окисленности, %
	общее	водорастворимые и окисленные минералы меди	вторичные сульфиды меди	первичные сульфиды меди	
1	1.82	0.77	1.04	0.01	42.31
2	10.40	8.06	2.55	0.20	75.05
3	10.29	4.52	5.58	0.22	43.93

сульфидами, содержащими в руде (%): халькозин – 0.7, ковеллин – 0.6, борнит – 0.3, халькопирит – 0.02, а также сульфатами и карбонатами. Содержание брошантита составляет 1.9, малахита – 0.1%. Присутствуют в незначительном количестве силикаты меди, содержание хризоколлы 0.01%. Суммарное содержание медных минералов 3.63%.

**Проба № 2 и проба № 3** руды характеризуются высоким содержанием меди, более 10%, и различаются содержанием оксидных и сульфидных минералов меди. Степень окисленности минералов меди в пробе № 2 – 75.05%, в пробе № 3 – 43.93%. Содержание халькопирита одинаково – около 0.02% (табл. 1).

Для выщелачивания использована ассоциация ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов, выделенных из накопительных культур, полученных на усредненных пробах руды в качестве источника аборигенных микроорганизмов.

**Культивирование.** Накопительные культуры аборигенной ассоциации ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов получали из 10 г навесок усредненных проб руды, помещенных в колбы Эрленмейера на 250 мл со 100 мл стерильных сред. Штаммы *A. ferrooxidans* выделяли на среде Сильвермана и Люндгрена 9К [6] (г/л):  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  – 44.2,  $(NH_4)_2SO_4$  – 3.0, KCl – 0.1,  $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$  – 0.5,  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  – 0.5,  $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$  – 0.01 при pH 2.0 и 28°C, штаммы *A. thiooxidans* – на среде Ваксмана [7] с элементной серой (г/л):  $S^0$  – 10.0,  $(NH_4)_2SO_4$  – 0.2,  $KH_2PO_4$  – 3.0,  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  – 0.5,  $CaCl_2 \cdot 6H_2O$  – 0.25,  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  – следы при pH 3.0 и 20 и 28°C, штаммы *Sulfobacillus* – на среде 9К, содержащей 0.02% дрожжевого экстракта, при температурах 20, 35, 42 и 50°C, штаммы архей – на модифицированной среде 9К, содержащей 3.7 г/л закисного железа при pH 1.8 и температурах 20, 35 и 42°C. Выделение штаммов *Leptospirillum* проводили в том же диапазоне температур на среде следующего состава (г/л):  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  – 13.89,  $(NH_4)_2SO_4$  – 0.2,  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  – 0.4,  $K_2HPO_4$  – 0.1, KCl – 0.1 при pH 1.9–2.4.

Выращивание культур проводили на роторной качалке со скоростью вращения 300 об/мин при разных температурах (от 20 до 50°C). Для выделения культуры доминирующего штамма проводили рас-

сев методом десятикратных предельных разведений. Культуры из пробирок с наибольшим разведением рассевали на твердую среду с 0.8% агарозы (“Promega”, США) и инкубировали в течение 2 нед при 20 и 28°C. Наиболее часто встречающиеся колонии отсевали на скошенную твердую среду того же состава для поддержания чистой линии и на жидкую среду 9К для экспериментальных целей.

**Условия экспериментов в перколяторах.** Выщелачивание усредненных проб медной руды, измельченных до размера 5 мм (проба № 1) и 15 мм (пробы № 2 и № 3), проводили в перколяторах, которые представляют собой вертикальный цилиндрический стеклянный сосуд диаметром 4 см и высотой 40 см, снабженный устройством для подачи компрессором воздуха, под давлением которого происходит просачивание раствора, содержащего минеральные соли и микроорганизмы, через субстрат, при температурах от –8 до +20°C. Значение pH 0.4 устанавливали для предотвращения замерзания раствора при –10°C. Для бактериального выщелачивания использовали минеральную основу среды 9К без закисного железа. Кислотность раствора регулировали 10 н. раствором серной кислоты и определяли на pH-метр-иономере Эксперт-001 (“Эконикс-Эксперт”, Россия). При снижении степени извлечения меди из руды периодически проводили смену выщелачивающего раствора.

Пробы № 2 и № 3 выщелачивали сначала раствором серной кислоты. Культуральную жидкость с бактериями добавляли на 21 сут после снижения степени извлечения меди.

**Аналитические методы.** Минеральный и химический состав проб руды анализировали с использованием титриметрического, фотометрического, атомно-абсорбционного методов и оборудования: фотометр КФК-2 (“ЗОМЗ”, Россия), атомно-абсорбционный спектрофотометр Analyst 100 (“Perkin Elmer”, США).

Концентрацию меди в растворах определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре 3100 фирмы “Perkin Elmer” (США).

Концентрацию железа в растворе измеряли модифицированным роданидным методом, исключаяющим влияние меди на определение элементов [8].

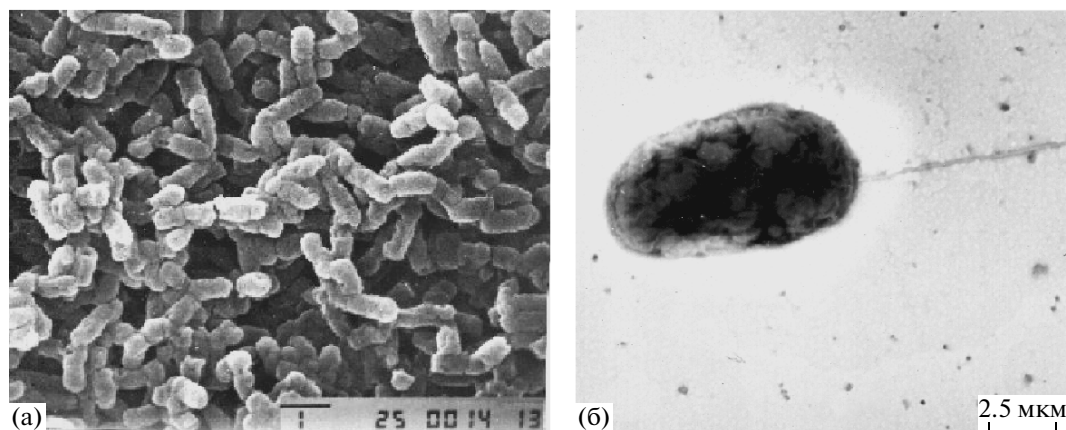


Рис. 1. Штамм *A. ferrooxidans* TFUd, выделенный из накопительной культуры. Вид клеток в электронном микроскопе со сканирующим устройством (а), – в просвечивающем режиме (б).

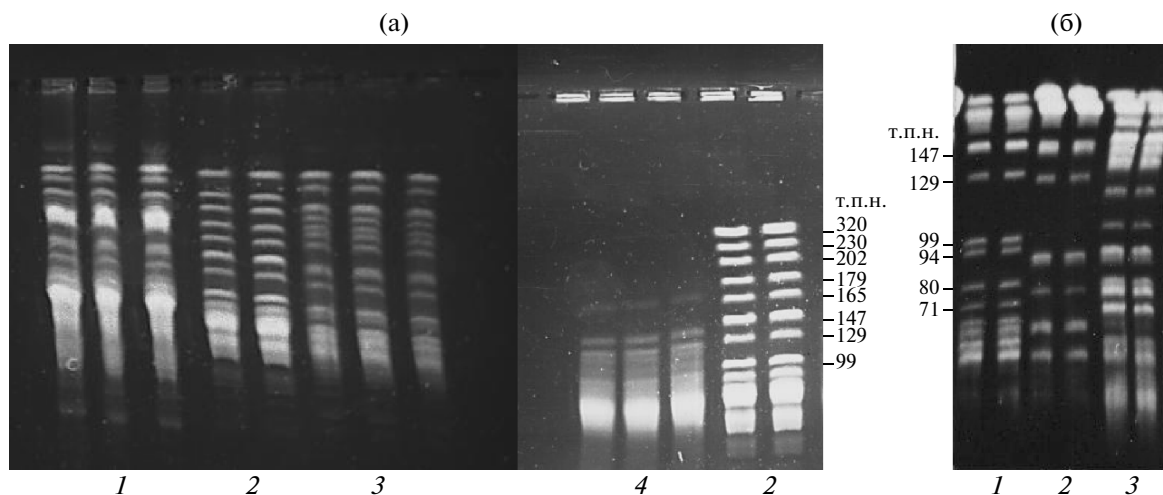


Рис. 2. Профиль фрагментов хромосомной ДНК штаммов бактерий:

а: 1 – *L. ferrooxidans* LUd, 2 – *A. ferrooxidans* ВКМ В-458 (размерный стандарт), 3 – *A. ferrooxidans* TFUd, 4 – *L. ferrooxidans* 97;

б: 1 – *A. ferrooxidans* ВКМ В-458, 2 – *A. ferrooxidans* TFBk, 3 – *A. ferrooxidans* TFUd.

Морфологию клеток микроорганизмов изучали с использованием светового микроскопа Olympus CX41 (“Olympus”, США) с фазово-контрастной приставкой и электронного микроскопа JEM-100С (“JEOL”, Япония) в просвечивающем режиме или со сканирующим устройством.

Структуру хромосомной ДНК штаммов анализировали методом пульс-электрофореза фрагментов нативной ДНК, расщепленной эндонуклеазами рестрикции *Xba*I для *Acidithiobacillus* и *Leptospirillum* [9] и *Not*I – для *Sulfobacillus* [10]. Условия пульс-электрофореза в режиме разделения крупных фрагментов: напряжение 12 В/см, время пульса 25 с, температура 15.5°C, продолжительность – 44 ч. Условия пульс-электрофореза в режиме разделения мелких фрагментов: напря-

жение 13 В/см, время пульса 10 с, температура 15°C, продолжительность – 72 ч.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Характеристика аборигенных кислотолюбивых хемолитотрофных микроорганизмов, выделенных из медной руды.** Из накопительной культуры аборигенных кислотолюбивых хемолитотрофных микроорганизмов был выделен штамм *A. ferrooxidans*, обозначенный TFUd. Общий вид клеток представлен на рис. 1а и 3а. Клетки имели форму коротких палочек шириной 0.4–0.5 мкм и длиной 0.6–0.8 мкм, снабжены одним полярным жгутиком (рис. 1б). Штамм TFUd является мезофильным организмом с оптимумом температуры 28–30°C, но он также хорошо растет и окисляет закисное железо при 5°C.

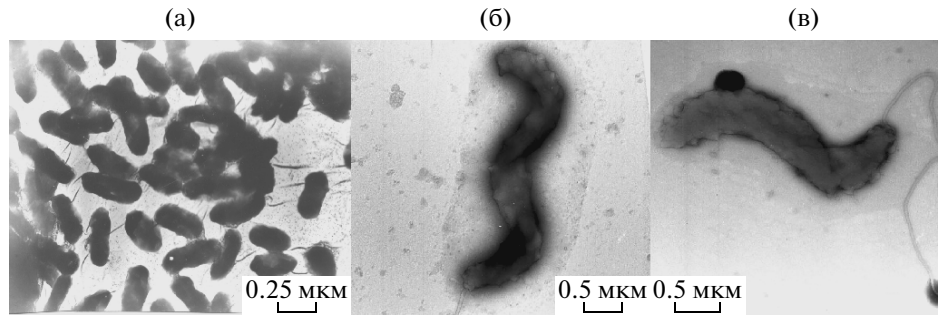


Рис. 3. Штаммы бактерий, выделенных из накопительной культуры. Вид в электронном микроскопе в просвечивающем режиме: *A. ferrooxidans* TFUd (а), *L. ferrooxidans* LUD (б, в).

Особенность этого штамма — устойчивость к низким значениям pH. Окислительная активность при значениях pH 1.1–1.3 была такой же, как и при оптимальных значениях pH 1.8–2.0. При изучении структуры хромосомной ДНК штамма TFUd методом пульс-электрофореза показано его отличие от других известных штаммов *A. ferrooxidans* (рис. 2).

В накопительной культуре при 20°C наряду с *A. ferrooxidans* наблюдали большое количество клеток лептоспирилл (рис. 3б, 3в). Морфологически клетки *L. ferrooxidans* LUD имеют форму вибрионов и спирилл, снабженных полярным жгутиком. По структуре хромосомной ДНК выделенный штамм существенно отличался от штамма *L. ferrooxidans* 97 из музея лаборатории хемолитотрофных микроорганизмов ИНМИ РАН (рис. 2а).

При 20 и 35°C был выделен новый изолят железо- и сероокисляющей бактерии *S. thermotolerans*, обозначенный SUD (рис. 4). Температура 35°C оказалась оптимальной для роста и окисления закисного железа штаммом SUD. Морфология штамма SUD типична для бактерий рода *Sulfobacillus*. Это грамположительные палочки размером 0.7–0.8 × 1.5–3.5 мкм, часто образовывали цепочки из четырех и более клеток, неподвижные. Штамм *S. thermotolerans* SUD в качестве источников энергии ис-

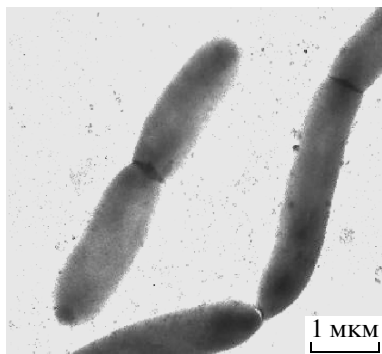


Рис. 4. Штамм *S. thermotolerans* SUD, выделенный из накопительной культуры. Вид в электронном микроскопе в просвечивающем режиме.

пользовал элементарную серу, закисное железо и сульфидные минералы. По строению хромосомной ДНК отличался от известных штаммов *S. thermosulfidooxidans*, *S. thermotolerans* и *S. sibiricus* (рис. 5) [10].

Штаммы бактерий *A. thiooxidans* и археи в пробах медной руды не обнаружены.

**Влияние температуры и значения pH раствора на выщелачивание пробы № 1 медной руды.** Выщелачивание руды при разных температурах и значениях pH проводили культуральной жидкостью, содержащей микроорганизмы аборигенной ассоциации и трехвалентное железо в концентрации 7.6–8.4 г/л. Результаты выщелачивания меди из пробы № 1 медной руды представлены в табл. 2. При одинаковом значении pH 1.6 извлечение серной кислотой протекало активнее, в среднем на 13%, при температуре +20°C, чем при +4°C. За 4 сут выщелачивания при температуре +20°C извлечение меди составило 35.9%, при +4°C — 24.4%. Более интенсивное извлечение меди в на-

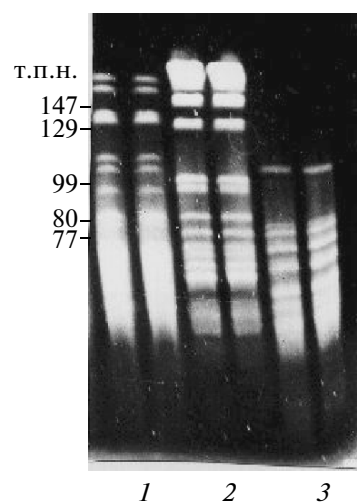


Рис. 5. Профиль фрагментов хромосомной ДНК штаммов *Sulfobacillus*: 1 — *S. sibiricus*, 2 — *A. ferrooxidans* VKM B-458 (размерный стандарт), 3 — *S. thermotolerans* SUD.

**Таблица 2.** Извлечение меди при бактериально-химическом выщелачивании пробы № 1 Удоканской медной руды в разных температурных режимах

Время выщелачивания, сут	Извлечение меди, %						
	20°C		4°C			0...–2°C	–8...–10°C
	pH 1.6	pH 1.0	pH 1.6	pH 1.0	pH 0.4	pH 0.4	pH 0.4
1	18.6	20.4	17.1	19.3	40.6	38.4	37.2
4	35.9	37.8	24.4	33.5	49.2	41.2	41.7
21	53.9	51.9	36.9	37.8	58.0	44.2	42.1
35	61.3	57.5	46.8	47.3	60.2	45.4	43.7
56	61.4	60.1	58.5	53.4	64.6	45.5	44.3
77	65.4	65.3	60.4	58.1	66.5	46.6	44.9
137	76.0	74.2	74.0	68.1	68.5	51.0	45.3
160	79.3	77.4	75.6	70.4	69.9	53.1	46.7

чале выщелачивания руды при значении pH 1.0 в температурных режимах 20 и 4°C, а также при pH 0.4 и более низких температурах шло за счет большей кислотности раствора. Извлечение меди за 4 сут при температуре от 0 до –2°C составило 41.2%, а от –8 до –10°C – 41.7%, что соответствует 77.6–89.3% меди в окисленных минералах руды. Однако высокая кислотность и низкие температуры ингибировали микроорганизмы – регенераторы окислителя Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> в бактериально-химическом процессе, поэтому со временем извлечение меди снижалось. Особенно это заметно при низких температурах: от 0 до –2°C и от –8 до –10°C.

Оптимальной температурой для жизнедеятельности доминирующего микроорганизма *A. ferrooxidans* являлась 28–30°C. Как видно из табл. 2, процесс выщелачивания меди из пробы № 1 шел относительно активно и при более низких, но положительных температурах, так как извлечение меди превышало содержание окисленных минералов. При отрицательных температурах бактерии полностью прекращали свою деятельность, что подтверждалось результатами выщелачивания: извлечение меди в конце процесса не превышало 46.7 и 53.1%, что немного больше содержания меди в окисленных минералах в руде (42.3%).

Извлечение меди из руды возрастало как при повышении температуры, так и при повышении значения pH от 0.4 до 1.6 при положительной температуре.

**Влияние температуры на выщелачивание проб № 2 и № 3 медной руды.** Выщелачивание меди из проб № 2 и № 3 медной руды проводили при 5 и 20°C при поддержании значения pH 1.6–1.9 (рис. 6).

В первые 5 сут в обоих температурных режимах наблюдали интенсивное растворение меди. В последующие 10 сут выщелачивание меди снижалось и практически прекращалось на 16–21 сут. При 20°C выщелачивание меди кислотой в течение

17 сут активнее происходило из пробы № 2, содержащей больше окисленных фаз меди, чем в пробе № 3 руды (рис. 6а, 6б). После добавления на 21 сут культуральной жидкости, содержащей микроорганизмы и 2.9 г/л Fe<sup>3+</sup>, извлечение меди возрастало, интенсивнее из пробы № 3, что объяснялось окислением сульфидных минералов.

При 5°C характер выщелачивания меди из обеих проб руды одинаков, и, так же, как при 20°C, извлечение меди больше из пробы № 2 (рис. 6в, 6г). После снижения извлечения меди добавление культуральной жидкости, содержащей микроорганизмы и ионы Fe<sup>3+</sup>, повышало растворение медных минералов очень незначительно в отличие от процесса при 20°C.

Извлечение меди при выщелачивании пробы № 2 при 20°C составило 83.61%, что ненамного больше, чем при 5°C – 81.63% (табл. 3). Извлечение меди при выщелачивании пробы № 3 при 20°C составило 60.32%, а при 5°C – 54.16% (табл. 3).

Извлечение меди из пробы № 1 за 35 сут – 46.8% при 4°C и pH 1.6 (табл. 2) ниже, чем при почти той же температуре и значении pH из пробы № 3 – 54.16% (табл. 3) и близкой степени окисленности минералов меди (42–43%) (табл. 1), что объясняется различием режимов выщелачивания и разным минеральным составом руды.

При снижении температуры выщелачивания медной руды извлечение меди уменьшалось на 2.4% из пробы № 2 и на 10.2% из пробы № 3, но повышался расход серной кислоты на извлеченную медь: на 12% на пробу № 2 и на 4% на пробу № 3 (табл. 3). Расход кислоты на выщелачивание меди 0.82–0.92 кг/кг меди из пробы № 2, содержащей больше окисленных минералов меди, больше, чем из пробы № 3 с меньшей степенью окисленности медных минералов – 0.52–0.54 кг/кг меди.

Таким образом, химическое растворение медных минералов происходит во всем диапазоне

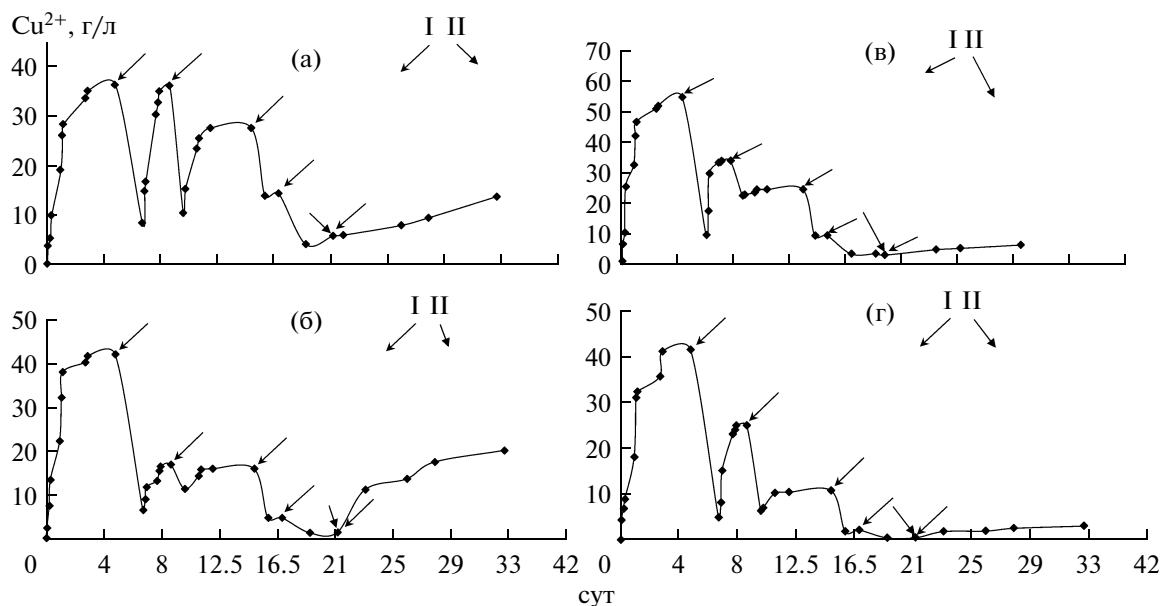


Рис. 6. Выщелачивание меди из пробы руды № 2 при 20°C (а), и из пробы № 3 (б); при 5°C – из пробы руды № 2 (в) и из пробы № 3 (г).  
I – смена выщелачивающего раствора, II – внесение культуральной жидкости с бактериями.

температуры от  $-10$  до  $+20^{\circ}C$  и интенсифицируется при повышении концентрации серной кислоты от рН 1.6 до 0.4. Ацидофильные хемолитотрофные микроорганизмы участвуют в процессе выщелачивания меди из руды при рН более 1.0 и при положительных температурах. Извлечение меди из руды возрастает при повышении темпе-

ратуры и при увеличении значения рН от 0.4 до 1.6 при положительной температуре. Расход серной кислоты в расчете на извлеченную медь возрастает при снижении температуры.

Проведенная работа показала возможность выщелачивания медных руд Удоканского месторожде-

Таблица 3. Извлечение меди и расход серной кислоты при бактериально-химическом выщелачивании проб № 2 и № 3 Удоканской медной руды в разных температурных режимах

Время выщелачивания, сут	Расход серной кислоты				Извлечение меди, %	
	кг/т руды		кг/кг меди			
	20°C	5°C	20°C	5°C	20°C	5°C
Проба № 2						
5	13.47	18.87	0.48	0.68	24.0	33.82
9	20.70	33.40	0.52	0.75	46.33	54.75
15	30.63	37.03	0.60	0.72	63.22	62.70
17	32.43	38.83	0.61	0.73	72.0	74.70
21	33.33	39.73	0.61	0.74	75.0	76.80
33	51.17	51.63	0.82	0.92	83.61	81.63
Проба № 3						
5	21.33	17.40	0.82	0.44	27.21	26.95
9	24.93	24.63	0.50	0.41	38.42	43.05
15	28.56	30.06	0.42	0.40	49.14	49.92
17	29.46	31.86	0.36	0.39	51.89	51.34
21	31.26	32.76	0.38	0.39	52.86	51.73
33	46.56	48.20	0.52	0.54	60.32	54.16

ния в условиях сурового климата растворами серной кислоты с pH 0.4 при температурах от  $-10^{\circ}\text{C}$  и выше и с применением ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов, регенерирующих окислитель  $\text{Fe}^{3+}$  и окисляющих упорные сульфидные минералы, содержащие медь, при положительных значениях температуры и низких значениях pH.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-04-00589.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каравайко Г.И., Кузнецов С.И., Голомзик А.И. 1972. Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руд. М.: Наука, 248 с.
2. Биоготехнология металлов. Практическое руководство / Ред. Г.И. Каравайко, Дж. Росси, А. Агате, С. Груднев, З.А. Авакян. М.: Центр международных проектов ГКНТ, 1989. С. 302–309.
3. Remonsellez F., Galleguillos F., van Rensburg S.J., Rautenbach G.F., Galleguillos P., Castillo D., Demergasso C. // *Advanced Materials Research*. 2007. V. 20–21. P. 539–542.
4. Hawkes R.B., Franzmann P.D., Plumb J.J. // *Proceed. 16<sup>th</sup> Intern. Biohydrometallurgy Symposium* / Eds. S.T.L. Harrison, D.E. Rawlings, J. Petersen. Cape Town, South Africa: Produced by Compress. 2005. P. 657–666.
5. Galleguillos P.A., Hallberg K.B., Johnson D.B. // *Advanced Materials Research*. 2009. V. 71–73. P. 55–58.
6. Silverman M.P., Lundgren D.G. // *J. Bacteriol.* 1959. V. 77. № 5. P. 642–647.
7. Waksman S.A., Joffe I.S. // *J. Bacteriol.* 1922. V. 7. № 2. P. 239–256.
8. Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю. Методы анализа природных вод / Ред. А.М. Антокольская. М.: Недра, 1970. С. 140–143.
9. Кондратьева Т.Ф., Мунтян Л.Н., Каравайко Г.И. // *Мол. генетика, микробиология и вирусология*. 1993. № 4. С. 19–22.
10. Кондратьева Т.Ф., Меламуд В.С., Цаплина И.А., Богданова Т.И., Сенюшкин А.А., Пивоварова Т.А., Каравайко Г.И. // *Микробиология*. 1998. Т. 67. № 1. С. 19–25.

## Leaching of Copper Ore of the Udokanskoe Deposit at Low Temperatures by an Association of Acidophilic Chemolithotrophic Microorganisms

T. F. Kondrat'eva<sup>a</sup>, T. A. Pivovarova<sup>a</sup>, L. N. Krylova<sup>b</sup>, V. S. Melamud<sup>a</sup>,  
E. V. Adamov<sup>b</sup>, and G. I. Karavaiko<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Winogradsky Institute of Microbiology Russian Academy of Sciences, pr. 60-letiya Oktyabrya 7/2, Moscow, 117312 Russia  
e-mail: kondr@inmi.host.ru

<sup>b</sup> National University of Science and Technology "MISIS," Leninskii pr. 4, Moscow, 119049 Russia  
e-mail: krulov@yandex.ru

Received January 19, 2011

**Abstract**—Pure cultures of indigenous microorganisms *Acidithiobacillus ferrooxidans* strain TFUd, *Lep-tospirillum ferrooxidans* strain LUd, and *Sulfobacillus thermotolerans* strain SUd have been isolated from the oxidation zone of sulfide copper ore of the Udokanskoe deposit. Regimes of bacterial-chemical leaching of ore have been studied over a temperature range from  $-10$  to  $+20^{\circ}\text{C}$ . Effects of pH, temperature, and the presence of microorganisms on the extraction of copper have been shown. Bacterial leaching has been detected only at positive values of temperature, and has been much more active at  $+20$  than at  $+4^{\circ}\text{C}$ . The process of leaching was more active when the ore contained more hydrophilic and oxidized minerals. The possibility of copper ore leaching of the Udokanskoe deposit using sulfuric acid with pH 0.4 at negative values of temperature and applying acidophilic chemolithotrophic microorganisms at positive values of temperature and low pH values was shown.