

**¹Канаев А., ²Баймырзаев К., ³Семенченко Г., ⁴Канаева З.,
⁵Сулейменова Б., ⁶Бекебаева М.**

¹доктор биологических наук, профессор, e-mail: ashim1959@mail.ru, тел.: +7 701 820 2787
²доктор геологических наук, профессор, e-mail: ashim1959@mail.ru, тел.: +7 701 777 1255
Жетысуский государственный университет им. И. Жансугурова, Казахстан, г. Талдыкорган,
³кандидат биологических наук, e-mail: annasemenchenko@yahoo.com, тел.: +7 777 298 24 45
⁴кандидат химических наук, e-mail: kanaeva1992@mail.ru, тел.: +7 701 727 9206
⁵магистр биологии, e-mail: Suleymenovabalday@gmail.com, тел.: +7 702 965 4962
⁶магистр ИПББ, e-mail: ashim1959@mail.ru, тел.: +7 702 953 7366
Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

ВЫЯВЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУДЫ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Казахстан, обладая довольно внушительными запасами золота, производит около 20 тонн ежегодно, что не отвечает потребностям Республики. Причина – низкое извлечение золота из-за отсутствия надежной технологии и повышенной упорности руд казахстанских месторождений.

Использование традиционных методов переработки руд зачастую не дает желаемых результатов. Широко известные методы биоокисления также не эффективны по причине специфической токсичности казахстанских руд по отношению к ацидофильным микроорганизмам. В связи с этим разработка оригинальных методов биоокисления руды, основанных на использовании аборигенных штаммов, остается актуальной проблемой. Ранее были осуществлены поиски ацидофильных микроорганизмов – активных окислителей золотомещающих минералов на ряде месторождений Казахстана и получены их эффективные ассоциации. В настоящее время отрабатываются параметры биохимической технологии извлечения золота из руды месторождения Большевик. Цель настоящего исследования – выбор наиболее оптимальной степени измельчения золотоносной руды месторождения Большевик для эффективного извлечения золота с использованием технологии двухстадийного выщелачивания. В результате данного исследования будет сделан вывод о необходимости сверхтонкого измельчения руды, что позволит сэкономить энергетические затраты. В работе использованы традиционные микробиологические и гидрометаллургические методы.

Ключевые слова: биохимическое выщелачивание, ассоциации бактерий, тиосульфат, золото.

¹Kanaev A., ²Bajmyrzaev K., ³Semenchenko G., ⁴Kanaeva Z., ⁵Sulejmenova B., ⁶Bekebaeva M.

¹doctor of biology, professor, e-mail: ashim1959@mail.ru, tel.: +7 701 820 2787
²doctor of geology, professor, e-mail: ashim1959@mail.ru, tel.: +7 701 777 1255
Zhetysu State University named I. Zhansugurov, Kazakhstan, Taldykorgan
³candidate of biology, e-mail: annasemenchenko@yahoo.com, tel.: +7 777 298 24 45
⁴candidate of chemistry, e-mail: kanaeva1992@mail.ru, tel.: +7 701 727 9206
⁵magistor of biology, e-mail: Suleymenovabalday@gmail.com, tel.: +7 702 965 4962
⁶magistor of biology, e-mail: ashim1959@mail.ru, tel.: +7 702 953 7366
Kazakh national University al-Farabi, Kazakhstan, Almaty

Reveling of the most optimal ore disintegration scale for effective gold extraction by microbiological method

Kazakhstan possesses impressive stocks of gold. But production of gold is for about 20 tons annually. It does not meet requirements of the Republic. The reason of this situation is in low extraction of gold because of the absence of reliable technology and the raised persistence of the Kazakhstan deposits

ores. The use of traditional methods of ores processing frequently does not give desirable results. Widely known methods of biooxidation also are not effective because of specific toxicity of the Kazakhstan ores in relation to acidophilic microorganisms. In this connection working out of original methods of biooxidation of the ore, based on native strains use, remains an actual problem. Earlier searches of acidophilic microorganisms – active oxidizers gold-bearing minerals on a number of deposits of Kazakhstan have been carried out. Active strains of acidophilic bacteria were isolated and investigated and their effective associations are received. Now parameters of biochemical technology of gold extraction from Bolshevik deposit ore are investigating. The purpose of the present research was a choice of the optimal degree of gold-bearing Bolshevik deposit ore crushing for effective extraction of gold. The technology has been based on two-stage bio-leaching. On first stage a biooxidation of crushed ore with two perspective associations of acidophilic bacteria were conducted. On the second stage the chemical extraction of gold with thiosulfate solution takes place. As a result of the given research the conclusion will be drawn on necessity of super thin crushing of ore that will allow saving power expenses. In work traditional microbiological and hydromet-allurgical methods are used.

Key words: biochemical leaching, bacterial association, thiosulfate, gold

¹Канаев А., ²Баймырзаев К., ³Семенченко Г., ⁴Канаева З., ⁵Сулейменова Б., ⁶Бекебаева М.

¹биология ғылымдарының докторы, профессор, e-mail: ashim1959@mail.ru, тел.: +7 701 820 2787

²геология ғылымдарының докторы, e-mail: ashim1959@mail.ru, тел.: +7 701 777 1255

I. Жансүгіров атындағы Жетісу мемлекеттік университеті, Қазақстан, Талдықорған қ.

³биология ғылымдарының кандидаты, e-mail: annasemenchenko@yahoo.com, тел.: +7 777 298 24 45

⁴химия ғылымдарының кандидаты, e-mail: kanaeva1992@mail.ru, тел.: +7 701 727 9206

⁵жаратылыстану ғылымдарының магистрі, e-mail: Suleymenovabalday@gmail.com, тел.: +7 702 965 4962

⁶жаратылыстану ғылымдарының магистрі, e-mail: ashim1959@mail.ru, тел.: +7 702 953 7366

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

Микробиологиялық әдіспен алтынды тиімді өндіру үшін кендерді ұсақтаудың ең оңтайлы деңгейін анықтау

Қазақстан алтын қоры бойынша Республиканың талаптарына сай емес, яғни жыл сайын 20 тонна алтын өндіріледі. Себеп – қазақстандық кен орындарының кеннің қаттылығы мен алтынды өңдейтін сенімді технологиялардың аздығы. Кенді өңдейтін дәстүрлі әдістер оң нәтиже көрсетпейді. Кең таралған биототығу әдістері де қазақстандық кендерінің ацидофильді микроорганизмдерге зияндылық себебінен эффективті емес. Осыған байланысты абориген штамдарға негізделген биототығу әдістердің қолданылуы өзекті мәселе болып отыр. Бұдан ерте Қазақстанның кен орындарындағы алтынды белсенді тотықтыратын ацидофильді микроорганизмдерді іздестіруі қарастырылған және олардың тиімді ассоциациялары алынды. Қазіргі кезде Большевик кен орнынан алынған алтынды өндірудің биохимиялық технологиясының параметрлері өңделуде. Бұл зерттеудің мақсаты – Большевик кен орнынан алтынды екі сатылы шаймалау әдісі арқылы эффективті жолмен өңдеу. Зерттеу нәтижесі бойынша кеннің ұсақтау қажеттілігі туралы қорытынды жасалды, ол кеннің энергетикалық шығынын экономдауға мүмкіндік береді. Жұмыста дәстүрлі микробиологиялық және гидрометаллургиялық әдістер қолданылды.

Түйін сөздер: биохимиялық шаймалау, бактерия ассоциациялары, тиосульфат, алтын.

Введение

За последние годы промышленное применение микроорганизмов с целью извлечения ценных компонентов из руд достигло широких масштабов в разных странах мира. В различных странах ведутся исследования по бактериальному выщелачиванию металлов из упорных руд, а также отходов обогащения, пыли, шлаков и т.д. Разрабатываются способы бактериального выщелачивания золота, марганца, цветных металлов. Внедрение бактериального выщелачивания, как и др. гидрометаллургических способов добычи металлов имеет боль-

шее экономическое значение. Расширяются сырьевые ресурсы за счёт использования бедных и потерянных в недрах руд и т.д. Биовыщелачивание обеспечивает комплексное и более полное использование минерального сырья, повышает культуру производства, не требует создания сложных горнодобывающих комплексов, благоприятно для охраны окружающей среды (Brierley, 2001:233; Bhakta, 2002:31; Минеев, 2005:8; Zammit, 2012:45). В промышленных масштабах бактериальное выщелачивание применяется для извлечения меди из забалансовых руд в США, Перу, Испании, Португалии, Мексике, Австралии, Югославии и др. странах.

В ряде стран (США, Канада, ЮАР) бактерии используются для выщелачивания урана (Таскеев, 2008:98; Каравайко, 2000:20; Башлыкова, 2003:251; Clark, 2006:9).

Большой практический опыт эксплуатации биотехнологических промышленных установок добычи золота за рубежом показал высокую экономическую эффективность за счет снижения капитальных затрат и уменьшения эксплуатационных расходов при увеличении извлечения золота и экологичности, причем, для биотехнологического процесса уровень эксплуатационных расходов самый низкий. Дальнейшее развитие этой отрасли производства представляет несомненный практический интерес. Установлено, что упорность руды на месторождениях обусловлена целым набором факторов, поэтому и переработка таких руд с использованием микроорганизмов требует комплексного подхода. В связи с этим основной тенденцией развития биогеотехнологий в настоящее время является использование смешанных культур кислотолюбивых бактерий (Yang, 2007:141; Zeng, 2010:68). Как правило, при адаптации лабораторных культур к руде конкретного месторождения рекомендуется применение ассоциации микроорганизмов, состоящей из бактерий *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, *L. ferrooxidans* и *Sulfobacillus* (Седельникова, 2005:59; Zaulochny, 2010:527). Европейские исследователи, учитывая сезонные колебания таких факторов, как температура и кислотность среды, осуществили эффективную предварительную обработку золотосодержащего концентрата (Spasova, 2011:600). В последнее время все большее внимание исследователи обращают на бактерии рода *Ferroplasma* (*Acidiplasma* sp.), как наиболее энергичного окислителя железа (Hill, 2011: 1021; Harrison, 2011: 818).

Бактериальное выщелачивание основано на разложении сульфидов кислотолюбивыми бактериями. После бактериального вскрытия сульфидов золото значительно легче извлекается цианированием. Извлечение золота бактериальным выщелачиванием может быть повышено на десятки процентов, а иногда многократно (Вайнштейн, 2011: 11; Никерк, 2015:1).

Механизм окисления основных золотосодержащих минералов хорошо изучен (Johnson 2009:201). По современным представлениям микробные культуры окисляют нерастворимые сульфидные минералы прямо либо косвенно. В случае прямого окисления разрушение кристаллической структуры сульфидного минерала происходит за счет ферментативных систем из

живых микроорганизмов. Косвенное окисление сульфидных минералов связано с действием иона железа (III), который, в свою очередь, является продуктом бактериального окисления соединений железа (II) и железосодержащих сульфидных минералов (Rohwerder 2003: 239; Живаева, 2007:253; Min, 2002:142).

Казахстан, обладая довольно внушительными запасами золота, производит около 20 тонн ежегодно, что не отвечает потребностям Республики (Мирошниченко, 2002: 216; Тусупова, 2014:191). Причиной является извлечение золота из-за отсутствия надежной технологии и повышенной упорности руд казахстанских месторождений. Использование традиционных методов переработки руд зачастую не дает желаемых результатов. Широко известные методы биоокисления также не эффективны по причине специфической токсичности казахстанских руд по отношению к кислотолюбивым микроорганизмам. В связи с этим разработка оригинальных методов биоокисления руды, основанных на использовании аборигенных штаммов, остается актуальной проблемой. Микробиологические обследования ряда казахстанских месторождений в 2015 г. показали, что ввиду специфических особенностей состава руд на таких месторождениях, как Акбакай, Бестобе, Большевик, преимущественное распространение получили виды кислотолюбивых микроорганизмов *Leptospirillum* и *Sulfolobus*. Такие энергичные окислители как *Acidithiobacillus* оказались ингибированы (Kanayev 2016:1051; Konysbayeva 2016:39). Активизация аборигенных штаммов *Acidithiobacillus* в ассоциации с *Acidiplasma* sp. значительно усилила воздействие на золотосодержащие минералы и привела к увеличению извлечения благородных металлов. Были получены перспективные ассоциации хемолитотрофных микроорганизмов (Канаева, 2015:323).

В настоящее время отрабатываются параметры биохимической технологии извлечения золота из руды месторождения Большевик.

Цель работы: выбор наиболее оптимальной степени измельчения золотосодержащей руды месторождения Большевик для эффективного извлечения золота с использованием технологии двухстадиального выщелачивания.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований выбрана мышьяковистая золотосодержащая руда месторождения Большевик. Месторождение Боль-

шевик находится в Жарминском районе Восточно-Казахстанской области. Ближайшими населенными пунктами являются станция Шалабай и поселок Ауэзов, которые расположены в 2,3 км и 5,0 км юго-западу и востоку от месторождения Большевик (рис. 1).

По геологической характеристике месторождение Большевик охватывает западный 3,5-километровый отрезок Кызыловской зоны, заключенный между Западно-Калбинским разломом на западе и участком Восточная Загадка на востоке. На месторождении по особенностям своего внутреннего строения исторически выделяются 4 участка (с запада на восток) с промышленным оруденением: Западный Большевик, Большевик, Чалобай и Холодный Ключ.

Площадь месторождения Большевик сложена терригенно-осадочными породами каменноугольной системы, корама выветривания развитыми над ними и частично третичными и четвертичными отложениями. В лежачем боку Кызыловской зоны преимущественно развиты песчано-сланцевые отложения, а в висячем боку – полимиктовые разнотерные песчаники верхней подтолщиалевролитопесчаниковой толщи (C₂S₂-C₂b). В разрезе самой Кызыловской зоны смятия преобладают песчано-сланцевые отложения бақырчикской свиты (C₃) (Мирошниченко, 2002: 216).

Как известно, повышение технологических показателей выщелачивания во многом зависит от степени раскрытия минералов. Задачу раскрытия в технологических схемах решают операции рудоподготовки. Показатели выщелачивания зависят не только от тонины помола, но и от селективности разрушения сростков. На этапе рудоподготовки использовали шаровую мельницу, так как этот тип оборудования надёжно зарекомендовал себя для снижения тонины помола руды. Уменьшение размеров частиц рудного тела до требуемых размеров достигалось путём механического воздействия в барабанной мельнице из серии VBM со стальными шарами, которые наполовину заполняют мельницу и перекачиваются в барабане при его вращении вокруг продольной оси (рис. 2). Крупность частиц руды после помола на мельницах контролировали на классификаторе (рис. 3).

Измельчение руды до размеров гранул 0,074 мм и 0,2 мм проводили в соответствии со схемами, изображенными на рис. 4.

Как известно, главным свойством, которое определяет металлургическую ценность золо-

тонной руды, является содержание золота в руде. В табл. 1 указано состояние запасов золота на месторождения Большевик (Тусупова 2014: 191).

Для проведения экспериментов по бивыщелачиванию золота из руды месторождения Большевик использовали две полученные ранее активные ассоциации ацидофильных бактерий: № 1 – *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Acidiplasma* sp.; № 2 – *Acidithiobacillus caldulus* и *Acidiplasma* sp. Соотношение входящих в состав ассоциаций культур было равным. Для культур бактерий *A. ferrooxidans* и *A. caldulus* использовали среду 9К Сильвермана и Лундгрена, а для *Acidiplasma* sp. – среду 9К Сильвермана и Лундгрена с добавкой дрожжевого экстракта в количестве 0,02% (Silverman 2009:642; Golyshina 2000:997). Бактерии культивировали в течении 14 суток, в течение которых контролировали накопление трехвалентного железа и титр бактерий в среде.

Окислительную способность исходных штаммов, выращиваемых на среде Сильвермана и Лундгрена 9К, определяли ежедневно комплексонометрически (Живаева, 2007:253).

Результаты исследования

Извлечение золота из золотомышьяковистой сульфидной руды месторождения Большевик является важной проблемой. В руде содержится пирит (FeS₂) и арсенопирит (FeAsS), представляющие основную трудность при извлечении золота существующими способами. При этом арсенопирит имеет более низкий электродный потенциал и селективно выщелачивается в первую очередь. Высвободившийся мышьяк токсичен для бактерий, поэтому важно определить оптимальную степень измельчения руды, так как слишком мелкое измельчение будет способствовать растворению именно этого минерала.

Основной задачей на данном этапе работ является вскрытие золота путем окисления сульфидных минералов. Эксперимент начали с изучения химического состава руды, то есть с выяснения количественного содержания элементов в руде. В процессе химического анализа было определено, что пробы золото-мышьяковистой руды месторождения Большевик содержат золото в количестве 2,9 г/т. Отмечено значительное количество (3,4%) железа, небольшое количество (0,02%) меди. Также в руде отмечено присутствие элементов различных геохимических групп: S – 1,2%; As – 0,91%; C – 1,4% приблизительно в одинаковом количестве (рис. 5).

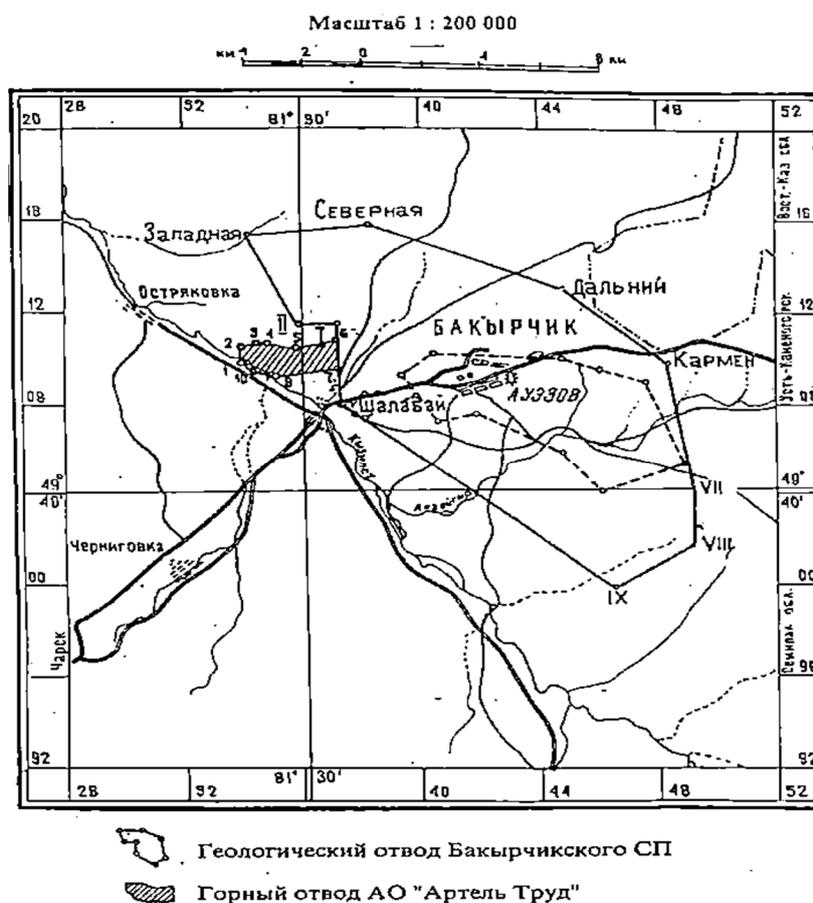


Рисунок 1 – Карта расположения месторождения Большевик



Рисунок 2 – Лабораторная шаровая мельница серии VBM



Рисунок 3 – Лабораторный классификатор размера гранул измельченной руды

В мировой практике для выщелачивания золота из золотосодержащих руд широко применяется цианирование. Несмотря на преимущества перед другими растворителями, высокая токсич-

ность цианидов вынуждает искать альтернативные растворители золота, удовлетворяющие ужесточенным экологическим требованиям. Среди таких методов выделяется тиосульфатный.

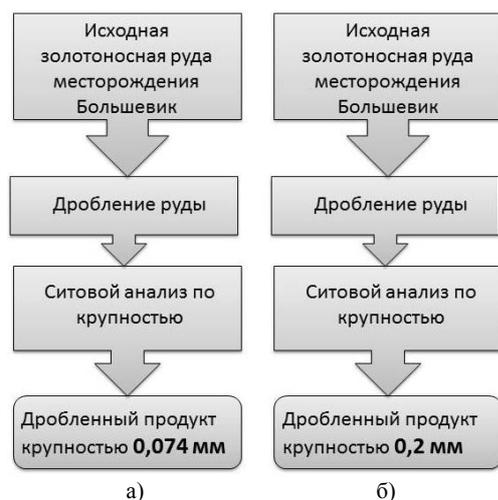


Рисунок 4 – Схема дробления и измельчения золотосодержащей руды месторождения Большевик (а – до размера гранул 0,074 мм, б – до размера – 0,2 мм)

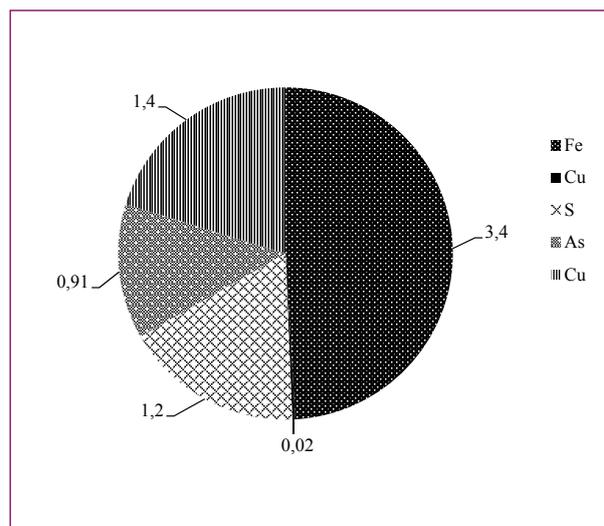


Рисунок 5 – Химический состав золотосодержащей руды месторождения Большевик

Таблица 1 – Состояние запасов золота по месторождению Большевик

| № блока и категория запасов | Запасы по рудным телам | | | Примечание |
|--------------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------|
| | руда, тыс. т | среднее содержание Au, г/т | среднее содержание золота, кг | |
| C ₁ | 1909,638 | 7,0 | 13422 | балансовые |
| C ₂ | 3004,000 | 6,1 | 18260 | сульфидные руды |
| C ₁ +C ₂ | 4913,638 | 6,4 | 31682 | |
| C ₂ | 38,000 | 2,9 | 109 | забалансовые руды |
| C ₂ | 281,562 | 1,1 | 324 | бедные окисленные руды |

Тиосульфатное выщелачивание золотосодержащей руды имеет большой потенциал для снижения воздействия на окружающую среду. В отличие от цианида, который является высокотоксичным элементом, химические вещества, используемые в процессе тиосульфатного выщелачивания, безопасны. Эта технология имеет большой потенциал в тех областях, где использование цианида абсолютно запрещено или подвергается интенсивному негативному освещению в СМИ по причине вредного воздействия на окружающую среду. В большинстве случаев в ходе этого процесса извлечение проводится практически идентично цианированию. При операциях извлечения, в которых учитывается природная сорбционная активность углистых компонентов руды, использование этого метода выщелачивания значительно эффективнее, чем использование цианида. Тиосульфатное выщелачивание хорошо подходит для инноваци-

онной технологии извлечения золота по принципу «смола в пульпе» (RIP). Процесс является щелочным, обычно выполняемым в диапазоне pH от 8 до 10, поэтому при выполнении извлечения не может возникнуть беспокойств по поводу коррозии оборудования. К преимуществам его относится также инертность к естественным углеродсодержащим адсорбентам цианидных комплексов. Основными химическими компонентами процесса тиосульфатного выщелачивания (тиосульфат аммония и сульфат аммония) являются обычные удобрения. Это открывает дополнительную возможность для использования растворов отходов шахт в сельском хозяйстве и в тех регионах, где соблюдаются экологические нормы (Fleming, 2003: 3; Wan, 2003:311; SGSMIneralservices, 2008:1).

В наших экспериментах мы остановились на тиосульфате как на менее токсичном растворителе золота. Использовался метод агитационно-

го выщелачивания. Данное исследование является предварительным этапом технологических исследований, которое позволяет на небольшом объеме материала выбрать оптимальный выщелачивающий реагент и установить максимально возможную степень извлечения золота из руды месторождения Большевик. На рис. 6 представлена схема двухстадийного биохимического выщелачивания золота из руды месторождения Большевик.

Эксперименты проводили с рудой, измельченной до классов крупности 0,074 мм – 80% и 0,2 мм – 80%. Навеску руды 80 г, смешивали с бактериальным раствором в объеме 400 мл. Полученную суспензию руды подвергали биовыщелачиванию при температуре 20°C, pH 2,0, интенсивности перемешивания 120 об/мин в течение пяти суток. Исходное количество бактериальных клеток во всех вариантах составлял 10⁷ кл/мл, исходное содержание окисного железа – 9,0 г/л. После полного восстановления количества трехвалентного железа в выщелачивающем

растворе проводили фильтрацию данного раствора для его регенерации.

Далее, отфильтрованный твердый остаток – кек подготовили к тиосульфатному выщелачиванию. Для этого, после процесса фильтрации полученный кек промывали дистиллированной водой с целью доведения кислотности раствора до нейтрального значения (pH 8,0). После этого твердый кек подвергали выщелачиванию раствором тиосульфата натрия в концентрации 20,0 г/л. Длительность опыта составляла 72 часа с двукратной заменой выщелачивающего раствора через каждые 24 часа для достижения глубокого растворения золота.

В качестве контроля служило химическое выщелачивание тиосульфатом натрия, в котором руда не подвергалась предварительному биоокислению. Всего проведено три варианта опыта, из них каждый вариант состоял из двух вариаций, которые проводили с рудой, измельченной до класса крупности 0,074 и 0,2 мм. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Бактериально-химическое выщелачивание золота ассоциативными культурами тионовых бактерий в зависимости от длительности и класса измельчения руды месторождения Большевик

| № | Класс крупности, мм | Длительность выщелачивания, час | Т:Ж | t, °C | pH | Титр бактерий до опыта, кл/мл | Извлечение золота, % | | | Титр бактерий после опыта, кл/мл |
|---|---------------------|---------------------------------|-----|-------|-----|-------------------------------|----------------------|---------------|----------|----------------------------------|
| | | | | | | | ассоциация №1 | ассоциация №2 | контроль | |
| 1 | 0,074 0,2 | 24 | 1:5 | 20 | 2,0 | 10 ⁷ | 52,9 | 59,0 | 34,0 | 10 ³ |
| | | | | | | | 40,4 | 43,5 | 30,4 | |
| 2 | 0,074 0,2 | 48 | 1:5 | 20 | 2,0 | 10 ⁷ | 68,3 | 74,2 | 55,5 | 10 ² |
| | | | | | | | 63,3 | 70,4 | 51,5 | |
| 3 | 0,074 0,2 | 72 | 1:5 | 20 | 2,0 | 10 ⁷ | 78,4 | 86,5 | 65,4 | 10 ² |
| | | | | | | | 72,1 | 75,8 | 60,3 | |

Как следует из таблицы, степень извлечения золота в раствор с классом измельчения руды до 0,074 мм при длительности выщелачивания 24 часа с ассоциацией культур №1 ниже (52,9%), чем с ассоциацией №2 (59,0%). В контрольном варианте выщелачивается всего 34,0% золота в раствор. Аналогичная тенденция наблюдается в варианте опыта с классом измельчения руды до 0,2 мм. Количество извлеченного золота в раствор в варианте опыта с ассоциацией культур №2 составляет на 3,0% и 14,0%, больше (Au – 43,5%), чем с ассоциацией культур №1 (Au – 40,4%) и в контрольном варианте (Au – 30,4%) опыта соответственно.

В ходе эксперимента выявлено, что степень измельчения руды перед выщелачиванием оказывает существенное влияние на эффективность последующего извлечения металла. Чем мельче гранулы руды (0,2 мм → 0,074 мм) и длительнее выщелачивание (24 час. → 48 час. → 72 час.), тем выше степень извлечения золота в раствор.

Анализ полученных результатов показал, что ассоциация культур №2 обеспечивает более высокое извлечение благородного металла как при классе крупности 0,074 мм, так и при 0,2 мм. С увеличением длительности выщелачивания до 48 часов с предобработкой ассоциацией культур №2 золота извлекается больше (74,2% с классом

крупности 0,074 мм и 70,4% – 0,2 мм), по сравнению с вариантами с ассоциацией культур №1 (68,3% и 63,3% соответственно) и контролем (55,5% и 51,5% соответственно). Аналогичная

тенденция наблюдается в варианте с продолжительностью 72 часа. В целом, использование предварительного биоокисления руды обеспечивает на 12-15% большее извлечение металла.



Рисунок 6 – Схема двухстадийного биохимического выщелачивания золота из руды месторождения Большевик

Подсчет количества жизнеспособных клеток бактерий методом серийных разведений в среде Сильвермана и Лундгрена 9К до и после выщелачивания тиосульфатом показал, что после экспозиции 24 часов количество жизнеспособных клеток уменьшается до 103 кл/мл. В вариантах с продолжительностью выщелачивания 48 и 72 часа количество жизнеспособных клеток не превышает 102 кл/мл. В данном случае можно говорить об устойчивости и приемлемой активности штаммов в присутствии тиосульфата (табл. 1).

Таким образом, наилучшие результаты наблюдались в варианте с ассоциацией культур бактерий №2 при измельчении руды до класса крупности 0,074 мм. Исследованные бактерии сохраняли свою жизнеспособность и активность при тиосульфатном выщелачивании.

Заключение

В результате проделанной работы были получены данные, полностью подтверждающие

правильность выбора подходов к переработке упорной руды месторождения Большевик.

Использование активной ассоциации ацидофильных бактерий на основе адаптированных штаммов рода *Acidithiobacillus* в сочетании с энергичным окислителем из рода *Acidiplasma* значительно усилило воздействие на руду, что выразилось в увеличении извлечения золота более чем на 10%. При этом не было необходимости сверхтонкого измельчения руды (0,045 мм), как это практикуют на ряде золотоизвлекательных фабриках. Выбранные микроорганизмы оказались устойчивыми к такому растворителю, как тиосульфат, и пролонгировали свое воздействие на руду во время химического извлечения золота. При использовании цианида это было бы невозможным. Таким образом, проведенное исследование показало перспективность продолжения разработки технологии биохимического выщелачивания золота из упорной руды с использованием ассоциаций аборигенных штаммов ацидофильных бактерий.

Литература

- 1 Башлыкова Т.В., Живаева А.Б., Дорошенко М.В. и др. Взаимодействие сульфидов и тионовых бактерий в различных условиях выщелачивания // Биотехнология: состояние и перспективы развития: матер. II Моск. междунар. конгресса. – М.: ЗАО ПИК Максима.- 2003. – Ч.2. – 251 с.
- 2 Bhakta P., Arthur B., Heap bio-leaching and gold-oxidation at Newmont Mining: first-year results // JOM. – 2002. – P.31-34.
- 3 Brierley J.A., Brierley C.L. Present and future of commercial application of biohydrometallurgy // Hydrometallurgy. – 2001. – V.59. – P.233- 239.
- 4 Вайнштейн М.Б., Филонов А.Е., Абашина Т.Н., Быков А.Г., Ахметов Л.И., Смолянинов В.В. Технология бактериального выщелачивания (часть 3) // Золото и технологии. – 2011. – № 1. – С. 11.
- 5 Golyshina O. B., Пивоварова Т. А., Каравайко Г. И., Кондратьева Т.Ф., Мур Е., Авраам В.Р., Lunsdorf Н., Тиммис К.Н., Якимов М.М., Golyshin П. Н. *Acidiplasma aeolicum* gen. nov. sp. nov., выделен из гидротермального источника и отнесен к виду *Acidiplasma cupricumulans* comb. nov. // Международный Журнал Систематическая и эволюционная Микробиология. – 2000. – Вып. 50. – № 3. – С. 997-1006.
- 6 Fleming C.A.; McMulien J., Thomas K.G. and Wells J.A. Recent advances in the development of an alternative to the cyanidation process– based on thiosulphate leaching and resin in pulp // SGS Mineral Services Technical Paper 2001-03., 09.10.2015.
- 7 Harrison S.T.L. Role of *Acidiplasma* sp. in bioleaching process // Proceeding of the 19 th International Biohydrometallurgy Symposium. – China, Changsha, September 18-22. – 2011. – P. 818.
- 8 Живаева А.Б., Башлыкова Т.В. Бактериальное выщелачивание силикатных никелевых руд // Цветные металлы. – 2007. – №3. – С.253-258.
- 9 Kanayev Ashimhan, Semenchenko Galina, Shilmanova Aliya. Associative cultures of chemolithotrophic microorganisms and their role in leaching of noble metals from Kazakhstan ores / Proceedings of International Scientific GeoConferemct. Bulgaria, Albena, 20-23 June. – 2016. – P.1051-1056.
- 10 Канаева З.К., Булаев А.Г., Канаева А.Т., Кондратьева Т.Ф. Физиологические свойства штаммов *Acidithiobacillus ferrooxidans* месторождений сульфидных руд Республики Казахстан // Ж. Микробиология. – 2015. – Т. 84. – № 3. – С. 323–330.
- 11 Clark M.E., a.o. Techological breakthroughs creating value // Hydrometallurgy. – 2006. – V.83. – № 1. – P. 9-26.
- 12 Johnson D.B. Hallberg K.B. Carbon iron and sulfur metabolism in acidophilic microorganisms // Adv. Microb. Phisiol. – 2009. – V. 54. – 201-255.
- 13 Каравайко Г.И., Седельникова Г. В. и др., Биогидрометаллургия золота и серебра // Цветные металлы. – 2000. – №8. – С. 20-26.
- 14 Konysbayeva A.A., Kanayev A.T., Kumanbeyeva M.S., a.o. Percolation bioleaching the gold from ores of Kazakhstan / European Biotechnology Conference. Latvia, May 05-07, 2016 // J. Biotechnology. – 2016. – Т. 231. – P. 39.
- 15 Min X., Chai L., Zhang Chuan-fu, Zhong Hai-yun, Kuang Zhong. Bioleaching of refractory gold ore (II). Mechanism of bioleaching of arsenopyrite by *Thiobacillus ferrooxidans*. (Central South Univ., KHP). Trans. Nonferrous Metals Soc. – China, 2002. – V. 12. – N 1. – P. 142-146.
- 16 Минеев Г.Г., Жучков И.А., Пунишко О.А., Минеева Т.С., Аксенов А.В. Биометаллургические и химические методы извлечения золота и серебра из нетрадиционных руд, концентратов и техногенного сырья // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2005. – № 2. – С. 8-17.
- 17 Мирошниченко Л.А., Жуков Н.М. Минерагеническая карта Казахстана. Масштаб 1: 2 500 000. – Алматы: Гылым, 2002. – 216 с.
- 18 Никерк Я., Хёвел К., Буурен К. Комплексные технологии для переработки упорного золота. BIOMIN South Africa (Pty) Ltd. 09.10.2015.
- 19 Rohwerder T., Gehrke T., Kinzler K., Sand W. Bioleaching review part A: Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulphide oxidation // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2003. – V. 63. - P/ 239-248.
- 20 Седельникова Г.В., Савари Е.Е., Кондратьева Т.Ф. Технология извлечения золота из упорных золотомышьяковых концентратов Албазинского месторождения с использованием бактерий // Горный журнал. 2005. – № 1. – С. 59–63.
- 21 Silverman M.P., Lundgren D.C. Study on the chemoautotrophic iron bacterium *Ferrobacillus ferrooxidans*. I. An improved medium and harvesting procedure for securing high cell yield // J. Bacteriol. – 1959. – Vol. 77. – № 5. – P. 642–647.
- 22 SGS Mineral services. Thiosulphate leaching – an alternative to cyanidation in gold processing.– T3 SGS 869 10-2008. – 09.10.2015.
- 23 Spasova I. I., Nicolova Marina V., Georgiev Plamen S., Groudev Stoyan N. Bacterial pretreatment of a gold-bearing pyrite/ arsenopyrite concentrate for improving the subsequent gold extraction // Proceedings of the 14 Balkan Mineral Processings Congress, Tuzla, June 14-16, 2011. V. 2. Tuzla. – 2011. – С. 600-603.
- 24 Тасекеев М.С. Достижения биотехнологии в нефтяной и горнометаллургической отраслях (обзорное исследование). – Алматы: Наука, 2008. – 98 с.
- 25 Тусупова Б.Х., Байгурын Ж.Д. Месторождения золота в Казахстане // <http://vestnik.kazntu.kz/?q=ru/node/191> 21.10.2014.
- 26 Yang Y., Wan M., Shi W/ et.al. Bacterial diversity and community structure in acid mine drainage from Daobaoshan Mine. China // Aquatic Microbial Ecology. – 2007. – V. 47. – P. 141-151.
- 27 Zammit C.M., Cook N., Brugger J., Ciobanu C.L., Reith F. The future of biotechnology for gold extraction and processing // Miner. Eng. – 2012. – V. 32. – P. 45-53.

28 Zaulochny P.A., Sedelnikova G.V., Savari E.E., Kim D.H., Pivovarova T.A. Kinetic dependence of refractory gold sulphide biooxidation using different microorganism association // Proceedings of XXV International Mineral Processing Congress, Australia, Brisbane, 2010. – P. 527-536.

29 Zeng W., Qui J., Zhou H et.al. Community structure and dynamics of the free and attached microorganisms during moderately thermophilic bioleaching of chalcopyrite concentrate // Bioresource Technology. – 2010. – V. 101. – P. 7068-7075.

30 Van Hille R.P., van Wyk N., Harrison S.T.L. Review of the microbial ecology of BIOX® reactors illustrates the dominance of the genus *Ferroplasma* in many commercial reactors // Proceedings of the 19th International Biohydrometallurgical Symposium, China, Changsha, September 18-22. – 2011. – V. 2. – P. 1021.

31 Wan R.-Y., LeVier K.M. Solution chemistry factors for gold thiosulfate heap leaching // Int. J. Miner. Process. 2003. – V. 72. – P. 311-322.

References

1 Bashlykov T.V., Zhivaeva A.B., Doroshenko M.V et.al. (2003) Vzaimodeistviye sulfidov I tionovyhbakteriy v razlichnykh usloviyakh vyschelachivaniya [Interaction of sulphides and thionic bacteria in various leaching conditions] // Biotehnologiya: sostoyanie I perspektivy: mater. II Mosk. Mezhdunar. Kongressa. M.: ZAO PIK Maksima. 2003. Part 2. 251p. (In Russian)

2 Bhakta, P., Arthur, B. «Heap bio-leaching and gold-oxidation at Newmont Mining: first-year results.» JOM (2002): 31-4.

3 Brierley, J.A., Brierley, C.L. «Present and future of commercial application of biohydrometallurgy.» Hydrometallurgy 59 (2001): 233- 39.

4 Clark, M.E., a.o.» Technological breakthroughs creating value.» Hydrometallurgy 83 (2006): 9-26.

5 Fleming, C.A., McMullen, J., Thomas, K.G. and Wells, J.A. «Recent advances in the development of an alternative to the cyanidation process – based on thiosulphate leaching and resin in pulp.» SGS Mineral Services Technical Paper 03 (2001).

6 Golyshina O. B., Pivovarova T.A., Karavay'ko G.I., Kondrat'yeva T.F., Mur E., Avraam V.R., Lunsdorf H., Timmis K.N., Yakimov M.M., Golyshin P.N. (2000) *Acidiplasma aeolicum* gen. nov. sp. nov., vydelen iz gidrotermal'nogo istochnika I otnesen k vidu *Acidiplasma aeolicum* gen. nov. sp. nov. [Acidiplasma aeolicum gen. nov. sp. nov., isolated from hydrothermal spring and identified as *Acidiplasma cupricumulans* comb. nov. // Mezhdunarodnyi zhurnal sistematicheskaya I evolyutcheonnaya mikrobiologiya] . V. 50, no 3. S.997-1006. (In Russian)

7 Harrison, S.T.L. «Role of *Acidiplasma* sp. in bioleaching process»: Proceeding of the 19th International Biohydrometallurgy Symposium, China, Changsha, September 18-22, 2011.

8 Johnson, D.B. Hallberg K.B. «Carbon iron and sulfur metabolism in acidophilic microorganisms.» Adv. Microb. Physiol. 54 (2009): 201-55.

9 Kanayev, Ashimhan, Semenchenko, Galina, Shilmanova, Aliya. «Associative cultures of chemolithotrophic microorganisms and their role in leaching of noble metals from Kazakhstans ores»: Proceedings of International Scientific GeoConference, Albena, Bulgari, June 20-23, 2016.

10 Kanayeva Z.K., Bulayev A.G., Kanayev A.T., Kondrat'eva T.F. (2015) Fiziologicheskie svoystva shtammov *Acidithiobacillus ferrooxidans* mestorozhdeniy sul'fidnykh rud Respubliki Kazahstan [Physiological properties of strains of *Acidithiobacillus ferrooxidans* of Kazakhstans Republik sulphid ores deposits] // J. Microbiology. V. 84, no 3. P. 323–330. (In Russian)

11 Karavay'ko G.I., Sedel'nikova G.V. et.al. (2000) Biogidrometallurgiya zolota I serebra [Biohydrometallurgy of gold and sylvia] // Nonferrous metals. no.8 .S. 20-26. (In Russian)

12 Konysbayeva, A.A., Kanayev, A.T., Kumanbeyeva, M.S., a.o. «Percolation bioleaching the gold from ores of Kazakhstan»: European Biotechnology Conference, Latvia, May 05-07, 2016.

13 Min, X., Chai L., Zhang, Chuan-fu, Zhong, Hai-yun, Kuang Zhong. «Bioleaching of refractory gold ore (II). Mechanism of bioleaching of arsenopyrite by *Thiobacillus ferrooxidans*.» Trans. Nonferrous Metals Soc. China, 12 (2002):142-46.

14 Mineev G.G., Zhuchkov I.A., Punishko O.A., Mineeva T.S., Aksenov A.B. (2005) Biometallurgicheskiye I himicheskiye metody izvlecheniya zolota I serebra iz netraditsionnykh rud, kontchentratsiy I tehnogennoy syr'ya [Biometallurgical and chemical methods of gold and sylvia extraction from nontraditional ores, concentrations and technogenic resources] // Izvestiyavuzov. Tsvetnaya metallurgiya. no 2. S.8-17. (In Russian)

15 Miroshnichenko L.A., Zhukov N.M. (2002) Mineragenicheskaya karta Kazahstana, masshtab 1: 2 500 000 [Mineragenic map of Kazakhstan, Scale 1: 2 500 000]. Almaty: Gylm. 216 p. (In Russian)

16 Nikerk, YA., Hirvel, K., Buuren, K. (2015) Kompleksnyye tehnologii dya pererabotki upornogo syr'ya [Complex technologies for persist ante gold processing] BIOMIN South Africa (Pty) Ltd, accessed October 09, 2015, <http://Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.>

17 Rohwerder, T., Gehrke, T., Kinzler, K., Sand, W. «Bioleaching review part A: Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulphide oxidation.» Applied Microbiology and Biotechnology 63 (2003): 239- 48.

18 Sedel'nikova G.V., Savari E.E., Kondrat'yeva T.F. (2005) Tehnologiya izvlecheniya zolota iz upornykh zolotomysy'yakovistykh kontchentratsiy Albazinskogo mestorozhdeniya s ispol'zovaniem bakteriy [Technology of gold extraction from persist ante gold-arsenic concentrates of Albazins deposit with bacteria using] // Gorniy zhurnal. no. 1. S. 59-63. (In Russian)

19 Silverman, M.P., Lundgren, D.C. «Study on the chemoautotrophic iron bacterium *Ferroplasma ferrooxidans*. I. An improved medium and harvesting procedure for securing high cell yield.» J. Bacteriol. 77 (1959): 642–47.

- 20 «SGS Mineral services. Thiosulphate leaching – an alternative to cyanidation in gold processing.», T3 SGS 869 10-2008.
- 21 Spasova, I. I., Nicolova, Marina V., Georgiev, Plamen S., Groudev, Stoyan N. «Bacterial pretreatment of a gold-bearing pyrite/arsenopyrite concentrate for improving the subsequent gold extraction»: Proceedings of the 14 Balkan Mineral Processings Congress, Tuzla, June 14-16, 2011.
- 22 Tasekeev M.S. (2008) Dostizheniyabiotekhnologii v neftyanoyigornometallurgicheskoyotraslyah (obzornoeissledovanie) [Achievements of biotechnology in oil and mining industries (overview investigation)]. Almaty: Science. 98 p. (In Russian)
- 23 Tusupova B.H., Baiyurin Zh.D. (2016) Mestorozheniya zolota v Kazahstane [Gold deposits in Kazakhstan]. <http://vestnik.kazntu.kz/?q=ru/node/191> (In Russian)
- 24 Yang, Y., Wan, M., Shi, W/ et.al. «Bacterial diversity and community structure in acid mine drainage from Daobaoshan Mine. China.» *Aquatic Microbial Ecology* 47 (2007): 141-51.
- 25 Zammit, C.M., Cook, N., Brugger, J., Ciobanu, C.L., Reith, F. «The future of biotechnology for gold extraction and processing.» *Miner.Eng.* 32 (2012): 45-53.
- 26 Zaulochny, P.A., Sedelnikova, G.V., Savari, E.E., Kim,D.H., Pivovarova, T.A. «Kinetic dependence of refractory gold sulphidebiooxidation using different microorganism association»: Proceedings of XXV International Mineral Processing Congress, Australia, Brisbane, 2010.
- 27 Zeng, W., Qui, J., Zhou, H et.al. «Community structure and dynamics of the free and attached microorganisms during moderately thermophilic bioleaching of chalcopyrite concentrate.» *Bioresourse Technology* 101(2010): 7068-75.
- 28 Zhivaeva A.B., BashlykovaT.V. (2007) Bakterial'noe vyschelachivaniye silikatnyh rud [Bacterial Leaching of siliceous nickel ores] // *Nonferrous metals*. 2007. no.3. P.253-258. (In Russian)
- 29 van Hille, R.P., van Wyk, N., Harrison, S.T.L. «Review of the microbial ecology of BIOX® reactors illustrates the dominance of the genus *Ferroplasma* in many commercial reactors»: Proceedings of the 19th International Biohydrometallurgical Symposium, China, Changsha, 2011.
- 30 Vaynshteyn M.B., Filonov A.E., Abashina T.N., Bykov A.G., Ahmetov L.I, Smolyaninov V.V. (2011) Tehnologiya bakterial'nogo vyschelachivaniya (chast' 3) [Technology of bacterial leaching (part 3)] // *Zoloto I tehnologiya*. no. 1. P.11. Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.. (In Russian)
- 31 Wan, R.-Y., LeVier, K.M. «Solution chemistry factors for gold thiosulfate heap leaching.» *Int. J. Miner. Process.* 72 (2003): 311-22.