

*Г. В. СЕМЕНЧЕНКО, А. Т. АБУБАКРИЕВ***АО « Центр наук о земле, металлургии и обогащения», Алматы, *www.asim.kz@mail.ru*

БИОХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ УПОРНЫХ РУД

Для извлечения благородных металлов из упорных руд была разработана технология биохимического выщелачивания на основе использования комплексного выщелачивающего раствора. В состав биохимического агента вошли: жидкие гетеротрофные бактерии, запатентованные под названием *Pseudomonas aureofaciens* «Т-10 ИМиО» в концентрации 10^8 кл/см³, а также аминокислота – 0,04 мол, роданид – 0,01 мол и цианид – 0,1 мол. Технология прошла укрупнено-лабораторные и опытно-промышленные испытания в производственных помещениях ТОО «НАЦ «Биомедпрепарат» на руде месторождения Бестобе. Условия выщелачивания: pH 9,8-10,0; температура – 20-23 °С; перемешивание в чане – 100 об./мин.; соотношение Т:Ж = 1:2. Продолжительность выщелачивания 8-16 ч, после чего производится смена выщелачивающего раствора (при необходимости 2-6 раз в зависимости от состава руды и желаемого результата). Осветленный раствор поступает на сорбцию, обеззолоченные отвалы – в хвостохранилище. Извлечение золота составило 91 %, серебра – 40 %. Для сравнения извлечение золота на месторождении Бестобе сейчас составляет 70 %. Результаты опытно-промышленных испытаний позволяют рекомендовать биохимическое выщелачивание золота с использованием комплексного биохимического агента на месторождении Бестобе, что позволит поднять извлечение золота на 20 %, а также дополнительно извлекать редкие металлы из числа тугоплавких (титан, молибден). Как показали технико-экономические расчеты, экономия себестоимости 1 кг золота при использовании комплексного биохимического агента составляет \$32386,2 за год. При условии дополнительного извлечения за год молибдена и титана на сумму \$496375 общая прибыль от использования комплексного выщелачивающего агента составит \$528761,2 в год. Разработанная технология будет способствовать снижению антропогенной нагрузки на природные экосистемы и увеличит сквозное извлечение золота.

Ключевые слова: комплексный биохимический выщелачивающий агент, благородные, редкие металлы.

Введение. В решении проблемы переработки упорного золотосодержащего сырья в настоящее время участвует все крупнейшие компании, являющиеся производителями благородных металлов из рудного сырья.

Разработаны и внедряются в промышленность новые технологические процессы, такие как гидрохимическое, автоклавное и бактериальное вскрытие золотосодержащих сульфидных руд и концентратов; бесцианидные способы гидрометаллургического извлечения золота и серебра. Так, компания Gencor разработала технологию биоокисления сульфидных минералов BIOX. Компания Vas Teck разработала аналогичный процесс BASOX для арсенопиритных руд. Компания Newmont Mining разработала технологию BioPro для активизации биоокисления складированных бедных упорных руд [1, 2].

Некоторые из предлагаемых способов отличаются оригинальностью технологических решений: предложен процесс извлечения благород-

ных металлов с использованием культуры бактерий, поглощающих серу в руде [3]. Сообщается о технологии биовыщелачивания, при которой культура железоокисляющих бактерий вводится непосредственно в брикет руды [4]. Рекомендованы процессы биовыщелачивания сульфидных руд с небольшими добавками цистина, повышающими эффективность окисления пирита и в присутствии органических жидкостей, окисляющих халькопирит [5, 6]. Рассмотренные методы основаны на применении тионовых бактерий, которые окисляют сульфиды металлов и двухвалентное железо, а продукты окисления растворяют золото. Все разработанные на этой основе бактериальные способы не обладают селективностью действия по отношению к золоту и приводят к получению весьма неустойчивых растворов: наличие солей двухвалентного железа или понижение кислотности среды всегда приводит к осаждению золота из выщелатов. Более того, при переходе от экстремаль-

но кислого pH 1,5-2,0, при котором происходит вскрытие сульфидных минералов руд, к собственно выщелачиванию цианидами обязательно необходимы стадия промывки и защелачивания пульпы до pH 10,0-11,0, в процессе которого происходит выпадение ярозита при pH 8,0, что существенно осложняет технологический процесс.

Одним из перспективных направлений в золотоперерабатывающей промышленности являются технологии, основанные на использовании природных гетеротрофных бактерий. Установлено, что таковыми являются представители родов *Bacterium*, *Bacillus*, *Chromobacterium*, *Pseudomonas*, *Sarcina*. Выявлены возможности интенсификации бактериального растворения золота [7, 8]. Приведены схемы получения золота из пиритов и арсенопиритов с использованием биологических агентов (*Aspergillus niger*, *Aeromonas*), рассмотрены процессы экстракции золота гетеротрофными микроорганизмами, проиллюстрированы примеры технологических схем, применяющихся на практике [9, 10]. Основным недостатком вышеописанных бактерий является их ограниченное использование только при переработке латеритных руд. В связи с этим поиск бактерий, пригодных для переработки сульфидных руд является актуальным.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов. В лаборатории благородных металлов АО «ЦНЗМО» на протяжении ряда лет проводятся целенаправленные исследования по созданию физико-химических основ биохимической технологии переработки упорного золотоносного сырья с применением гетеротрофных бактерий, запатентованного под названием «Т-10 ИМиО». Отличительной особенностью данных бактерий является их продуцирование золоторастворяющих метаболитов-комплексобразователей, устойчивость в щелочно-цианистых средах, а также окисление токсичных соединений серы, сурьмы и мышьяка. Эти свойства выделенных в Казахстане бактерий выгодно отличают их от известных на сегодняшний день гетеротрофов. Возможность существования в присутствии цианида позволяет напрямую использовать их при цианидном выщелачивании золота, а способность окислять соединения серы (сульфиды металлов) позволяет рекомендовать их для выщелачивания упорных руд. Сочетание этих двух полезных свойств бактерий «Т-10 ИМиО» придает технологии биовыщелачивания существенную новизну. При условии создания

непрерывно действующей технологической линии по производству сухой биомассы гетеротрофных бактерий, пригодной для транспортировки на месторождения, появляется возможность для внедрения этой технологии в производство [11].

Гетеротрофные бактерии «Т-10 ИМиО» неприхотливы, растут на обычных питательных средах (рыбопептонный бульон или разбавленная меласса), не требуют экстремальных условий культивирования ($t = 23-25\text{ }^{\circ}\text{C}$). При росте бактерии накапливают в культуральной среде аминокислоты и другие комплексобразователи, которые при выщелачивании интенсивно выделяются в выщелачивающий раствор и интенсифицируют процесс комплексобразования золота с цианидами. Установлено, что выделяемые бактериями метаболиты являются поверхностно-активными веществами, облегчающими взаимодействие между растворителями и золотовмещающими минералами, что делает возможным увеличение извлечения благородных металлов на 16-20 % (в зависимости от сырья). Процесс можно интенсифицировать увеличением концентрации одного-двух метаболитов бактерий, например, аминокислоты. На этом принципе был разработан комплексный биохимический выщелачивающий раствор, эффективно выщелачивающий благородные металлы из упорных руд казахстанских месторождений [12]. В настоящее время стоимость аминокислот на Казахстанском рынке велика, но ее можно существенно снизить, используя продуценты аминокислот из числа гетеротрофных бактерий, которые также можно культивировать на питательных средах и затем смешивать с основной популяцией бактерий. После высушивания в оптимальных условиях (лиофильно) и в соответствующей упаковке препарат можно хранить и транспортировать на довольно большие расстояния, затем разводить в обычной воде и добавлять в цианидный процесс.

Опытно-промышленные испытания технологии биохимического выщелачивания золота из руды месторождения Бестобе с использованием комплексного выщелачивающего агента. Для проведения опытно-промышленных испытаний комплексного биохимического выщелачивающего агента помимо проверки основных технологических параметров в укрупнено-лабораторном масштабе необходимым условием является выбор и описание техноло-

гической схемы. На основании проведенных исследований была выбрана схема выщелачивания благородных и редких металлов из упорной руды без предварительного гравитационного и флотационного обогащения. При этом предполагается использовать в своей основе существующую на многих месторождениях Казахстана аппаратную схему, введя в нее дополнительное оборудование по приготовлению питательной среды и наращиванию бактерий.

На всех предприятиях, занимающихся переработкой золотосодержащих руд, предусмотрено дробильно-сортировочное отделение, где руда проходит первичную подготовку – измельчение до определенного класса крупности. Было установлено, что для биохимического выщелачивания упорной руды необходимо измельчать руду до класса 0,074-0,1 мм. В отдельных случаях размер зерен может быть увеличен до 1-2 мм. Более тонкое измельчение руды до 0,044 мм, используемое на ряде предприятий, в случае биохимического выщелачивания нецелесообразно, так как для активной деятельности микроорганизмов немаловажное значение имеет их иммобилизация на твердых поверхностях, несущих достаточную информацию о ее составе для эффективного взаимодействия.

Измельченная руда подается на участок биохимической переработки. С целью влагонасыщения и предварительной бактериальной обработки руду можно смешать с суспензией гетеротрофных бактерий с титром 10^8 кл/см³ до влажности 50-60 %.

Основными операциями биохимического выщелачивания благородных и редких металлов из пирит-арсенопиритной руды являются:

- приготовление питательной среды;
- наращивание биомассы бактерий;
- приготовление раствора для выщелачивания;
- выщелачивание благородных металлов;
- отстаивание, транспортирование жидкой фазы на сорбцию;
- выщелачивание твердой фазы смесью 15-20 % растворами серной и соляной кислот для извлечения редких металлов.

В ферментере осуществляются все операции, связанные с выращиванием гетеротрофных бактерий – растворение сухого питательного бульона, стерилизация, охлаждение, засев и выращивание бактерий, выгрузка культуральной жидкости бактерий, транспортировка в чан для

проведения выщелачивания. Конструкция ферментера должна предусматривать необходимый режим стерилизации, обычно – 1 атм. в течение 30 мин. Засев и выращивание гетеротрофных бактерий производится с соблюдением правил асептики для недопущения контаминации нежелательной микрофлорой. В зависимости от необходимого объема культуральной жидкости объем ферментера может быть от 20 до 200 дм³. Максимальная концентрация бактерий, которую можно вырастить в ферментере без угрозы фаголизиса – 10^9 кл/см³. Таким образом, выращенную культуральную жидкость можно разбавить в 10 раз.

В чане для выщелачивания осуществляются все операции, связанные с переработкой руды – загрузка-выгрузка твердой фракции, дозирование необходимых реагентов комплексного выщелачивающего агента: цианида, роданида, аминокислоты, щелочи, культуральной жидкости бактерий, воды. Рекомендуемые конечные концентрации всех компонентов растворяющего агента: цианид – 0,1 мол, аминокислота – 0,04 мол, концентрация бактерий – 10^6 - 10^8 кл/см³. Оптимальное соотношение Т:Ж = 1:2. Поддержание температуры на уровне 20-22 °С осуществляется подачей подогретого калорифером воздуха. Необходимая аэрация – 6-8 г/дм³ кислорода в реакционной зоне осуществляется компрессором. Интенсивность перемешивания пульпы в чане для выщелачивания зависит от объема резервуара. При использовании 16 м³ чана перемешивание пульпы обычно составляет 10-15 об./мин. После основного выщелачивания, которое в зависимости от упорности руды может составлять 10-16 ч, производится отсадка твердой фракции либо в чане, либо с использованием фильтровальной машины. Затем процесс повторяется со свежим выщелачивающим раствором, объем которого регулируется на уровне соотношения Т:Ж = 1:2. Количество стадий (2-6) определяется эмпирически в зависимости от используемой руды и желаемого уровня извлечения.

После выщелачивания благородных металлов перемешивание в чане останавливают на 10-20 ч для отстаивания, жидкую фазу перекачивают на сорбцию, в твердую добавляют смесь 15-20 % равного количества растворов серной и соляной кислот и выщелачивают 6-8 ч при Т:Ж = 1:3. Адаптированная таким образом технологическая схема позволяет извлекать бла-

городные и редкие металлы из числа тугоплавких (титан, молибден).

Биохимическая технология, основанная на гетеротрофных бактериях, была испытана на базе ТОО «НАЦ «Биомедпрепарат» в г. Степногорске, где также располагается золотоизвлекательная фабрика компании ОАО «Горно-металлургический концерн – «Казахалтын», перерабатывающей руду месторождения Бестобе.

Гетеротрофные бактерии культивировали в промышленных ферментерах в соответствии с оптимальными параметрами культивирования (рисунок 1). Испытания проводили с рудой, которая обычно используется на месторождении, работы были осуществлены в два этапа: первый – укрупнено-лабораторные испытания с целью окончательного подтверждения всех параметров и режимов выщелачивания руды месторождения Бестобе; второй – более масштабные, опытно-промышленные. На обоих этапах использовалась одна и та же популяция гетеротрофных бактерий и аналогичные партии химических реагентов. В укрупненно-лабораторных испытаниях использовали два варианта выщелачивания – цианидное (контроль) и биохимическое, в опытно-промышленных – только биохимическое в сравнении с реальным выщелачиванием на комбинате.



Рисунок 1 – Производственный ферментер ТОО «НАЦ «Биомедпрепарат»

Состав руды месторождения Бестобе: г/т: Au – 4,5; Ag – 2,8; %: Fe – 7,75; Cu – 0,51; Zn – 0,177; Ti – 0,17; Mo – 0,005; Co – 0,003; Ni – 0,001; As – 0,018; S – 3,91. Размер зерен: +0,074 мм – 0,1 мм – 80 %.

Укрупнено-лабораторные испытания проводили в лабораторном реакторе, емкостью 25 дм³, снабженном перемешивающим устройством и подачей воздуха (рисунок 2). Рабочий объем составлял 18 дм³, из которых 12 дм³ приходилось на растворитель и 6 кг – на руду. Сначала проводили цианидное, затем биохимическое выщелачивание. Комплексный раствор был приготовлен в соответствии с вышеприведенной рекомендацией. Длительность эксперимента – 48 ч с 3-кратной заменой выщелачивающего раствора через каждые 16 ч. Длительность опытно-промышленных испытаний – 88 ч с 5-кратной заменой выщелачивающего раствора. Выбранный режим соответствовал количеству емкостей при чановом выщелачивании на Бестобинском ГМК.

Выщелачивание благородных металлов. В лабораторном реакторе сначала готовили выщелачивающий раствор, затем при включенной мешалке засыпали измельченную руду и выщелачивали в течение 16 ч. Пульпу отстаивали, жидкую фазу сливали, фильтровали и анализировали, в твердую добавляли свежий выщела-

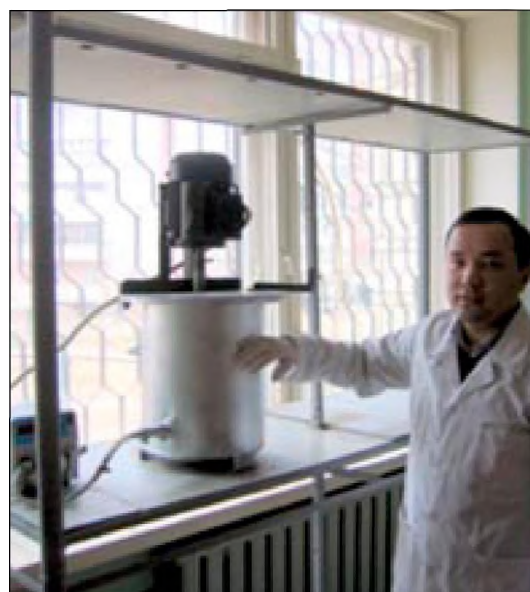


Рисунок 2 – Лабораторный реактор для проведения укрупнено-лабораторных испытаний

чивающий раствор и возобновляли процесс. После фильтрации осадок возвращали в реактор. В конце эксперимента весь осадок фильтровали для более полного удаления реагентов, промывали водой и затем использовали для выщелачивания редких металлов.

Выщелачивание редких металлов. В твердую фазу после выщелачивания благородных металлов добавляли смесь 15-20 % растворов серной и соляной кислот в равных пропорциях и при Т:Ж = 1:3 выщелачивали в течение 16 ч.

Результаты по укрупнено-лабораторным испытаниям биохимической технологии извлечения благородных и редких металлов из руды месторождения Бестобе с использованием комплексного биохимического агента приведены в таблице 1. Как показали сравнительные укрупнено-лабораторные испытания, извлечение золота при использовании биохимической технологии увеличивается на 23 %, серебра – на 5 %.

Таблица 1 – Извлечение благородных и редких металлов из руды месторождения Бестобе (укрупнено-лабораторные испытания)

Время, ч	Выщелачивание	Извлечение элементов, %			
		Au	Ag	Mo	Ti
16	цианидное биохимическое	33,4	17,1	8,8	0,5
		59,2	31,3	16,1	0
32	цианидное биохимическое	65,3	34,2	10,5	1,5
		77,5	41,9	19,3	0
48	цианидное биохимическое	71,0	43,0	23,1	2,0
		94,0	48,0	27,1	0
64	кислотное после цианидного	1,5	0	10,5	39,0
	кислотное после биохимического	2,0	0	19,8	51,2

Извлечение молибдена происходило как в щелочном, так и в кислотном режиме. Использование бактерий увеличивало извлечение этого металла в обоих режимах. Незначительное растворение титана наблюдалось только при цианидном выщелачивании, основное его извлечение в раствор происходило при обработке кек смесью соляной и серной кислот.

Использование бактерий при предварительном щелочном выщелачивании способствовало более полному переходу этого элемента в кек с последующим более высоким извлечением в раствор смесью кислот.

Опытно-промышленные испытания биохимической технологии извлечения благородных и редких металлов из руды месторождения Бестобе проводили в трех емкостях объемом около 2 м³ (рисунок 3). В каждую емкость с рабочим объемом по 1,5 м³ загружали по 500 кг руды и по 1 т жидкого комплексного выщелачивающего агента. Всего в испытаниях было переработано около 2 т измельченной руды и приготовлено около 20 т жидкого комплексного выщелачивающего агента. Средние результаты, полученные по 3-м одновременно испытанным образцам, приведены в таблице 2. Наибольшее количество благородных металлов растворилось в первые 16 ч, извлечение молибдена проходило равномерно в течение всего периода выщелачивания. Титан извлекался только в процессе кислотного выщелачивания. Получен акт испытаний.

Таблица 2 – Результаты опытно-промышленных испытаний биохимического выщелачивания благородных и редких металлов из руды месторождения Бестобе

Выщелачивание	Время, ч	Извлечение элементов, %			
		Au	Ag	Mo	Ti
Биохимическое	16	33,4	27,1	5,8	0
	32	59,2	33,3	12,1	0
	48	71,3	35,2	15,5	0
	64	78,5	37,9	19,3	0
	80	87,0	39,0	23,1	0
	88	90,0	40,0	25,7	0
Кислотное	16	1,0	0	24,8	57,2

В таблице 3 приведены оптимальные параметры чанового выщелачивания руды Бестобе с использованием комплексного выщелачивающего агента.

Результаты опытно-промышленных испытаний позволяют рекомендовать биохимическое выщелачивание золота с использованием комплексного биохимического агента на месторождении Бестобе, что позволит поднять извлечение золота на 20 %, а также дополнительно извлекать редкие металлы из числа тугоплавких (титан, молибден).



Рисунок 3 – Опытно-промышленные испытания биохимической технологии извлечения благородных металлов из руды месторождения Бестобе

Таблица 3 – Оптимальные режимы и параметры выщелачивания руды месторождения Бестобе по результатам опытно-промышленных испытаний

Наименование операций	Оптимальные условия	Продолжительность	Примечание
Измельчение руды	Гранулометрический состав руды по классам: +0,074 -2 мм - 80 %; +1 -2 мм - 20 %	Последовательное измельчение руды происходит в течение нескольких суток	Биохимическое выщелачивание не требует сверхтонкого измельчения, т.к. в процессе выщелачивания происходит дальнейшее уменьшение размера гранул за счет воздействия бактерий
Выщелачивание	pH 9,9-10,0; температура - 18-20 °С, перемешивание в чане - 100 об./мин; соотношение Т:Ж=1:2 - 1:4	4-8 ч в одном чане	Процесс не должен приводить к обильному пенообразованию, в противном случае использовать устройства для пеногашения
Отстаивание	В основном чане	Сутки	В случае неполного осветления производится корректировка объема выщелачивающего раствора
Фильтрация (как альтернативный способ осветления)	В фильтрационной машине или в сгустителе	4-6 ч	Кеки, в случае недостаточного извлечения благородных металлов, возвращаются в чан для выщелачивания
Сорбция золота на уголь	pH 9,8-10,0; температура - 20-30 °С	6 ч	Обеззолоченный раствор можно использовать в обороте

Технико-экономические расчеты процесса биохимического выщелачивания золота из упорной руды с использованием комплексного биохимического препарата. На месторождении Бестобе руда добывается открытым способом, при этом руда перерабатывается кучным и чановым способом. Выпуск золота составляет примерно 300 кг, из них методом чанового выщелачивания – 150 кг. Выпуск золота с использованием чанового выщелачивания в месяц составляет 13,64 кг и в сутки – 0,5 кг. При содержании золота в руде 6 г/т для получения 0,5 кг золота в сутки необходимо переработать 83 т руды при 100 % извлечении золота и 108 т при 70 % извлечении цианированием. На основании проведенных укрупнено-лабораторных и опытно-промышленных испытаний выщелачивания золота из упорной руды месторождения Бестобе было установлено, что извлечение золота биохимическим способом составляет 91-95 % при 20 °С. Таким образом, с использованием комплексного выщелачивающего агента возможно получить до 0,7 кг золота в сутки, 20,3 кг металла в месяц и 203,6 кг – в год при том же количестве перерабатываемой руды.

Для оценки экономической эффективности процесса была рассчитана ориентировочная

стоимость участка биовыщелачивания и расчет себестоимости золота, получаемого при чановом выщелачивании 3000 т руды месторождения Бестобе в месяц с использованием участка биовыщелачивания.

Расчет ориентировочной стоимости участка биовыщелачивания. Участок биохимического выщелачивания должен быть укомплектован ферментером, чаном для приготовления выщелачивающего раствора с дозаторами для основных компонентов выщелачивающего раствора, складскими помещениями для хранения агентов выщелачивания, экспресс-микробиологической лабораторией. Расчет ориентировочной стоимости участка со всеми входящими в него узлами приведен в таблице 4.

Как следует из таблицы, стоимость оборудования участка биохимического выщелачивания составляет 100910 тыс. тенге. Наиболее дорогостоящим оборудованием является ферментер.

Расход питательной среды и ее стоимость на 1 кг золота. Для переработки 3000 т руды в месяц необходимое количество жидкой фазы при Т:Ж = 1:1,5 с учетом 30 % возврата культуральной жидкости с оборотными водами составляет 3150 м³ в месяц или 105 м³ в сутки. Разовая

Таблица 4 – Ориентировочная стоимость участка биовыщелачивания

Наименование оборудования	Для каких целей	Количество	Стоимость, тыс. тенге
Ферментер (100 л)	Непрерывное наращивание биомассы бактерий для выщелачивания	1	100 500
Дозаторы	Дозировка реагентов для приготовления растворов выщелачивания (щелочь, цианид, аминокислота и др.)	5	10,0×5=50,0
Чаны (объем 0,25 дм ³)	Растворения реагентов	5	10,0×5=50,0
Чан (объем 1-2 м ³)	Приготовление растворов выщелачивания	1	10,0
Холодильник	Хранение культур бактерий и питательных сред	1	65,0
Микроскоп	Контроль чистоты культуры, определение титра бактерий	1	150,0
Облучатель настенный ОБН	Стерилизация воздуха в боксе, помещении приготовления раствора, в помещении выщелачивания	3	15,0×3=45,0
Термостат суховоздушный	Лабораторное культивирование бактерий	1	25,0
Чашки Петри	Лабораторное культивирование бактерий	200	5,0
Пипетки, пробирки, шпатель, стаканы стеклянные	Пересев культуры в лабораторных условиях	200	5,0
Спецодежда (халат, тапочки, колпак)	Работа в микробиологической лаборатории	1	5,0
Итого			100910,0

загрузка 100 дм³ ферментера не превышает 80 дм³, часть культуральной жидкости при этом используется для засева следующей партии. С учетом получения суспензии бактерий в ферментере с титром 10⁹ кл/мл, которую для рабочего процесса можно разбавить в 100000 раз, необходимое количество культуральной жидкости в сутки составляет 0,08 м³ или 80 дм³ в сутки (3150 дм³ в месяц). При этом для начала процесса необходим 8-10-дневный запас культуральной жидкости бактерий с вышеуказанным титром, поскольку именно такой срок необходим для наращивания биомассы в ферментере.

Расход сухой питательной среды по рецептуре завода-изготовителя (2,6 г/дм³) в сутки составит $2,6 \times 80 = 208$ г, в месяц – 8,2 кг.

При стоимости 1 кг питательной среды по розничной цене – 8000 тг общая стоимость питательной среды в месяц составит 65600 тг или \$437,3. При использовании мелассы ее расход (по рецептуре 20 г/дм³) в сутки составит $20,0 \times 80 = 1600$ г, в месяц – 63 кг.

Стоимость мелассы – 200 тг/кг. Стоимость мелассы в месяц составит 12600 тг или \$84.

Как уже было отмечено ранее, из 3000 т руды, содержащей 6 г/т золота можно получить при 95 % извлечении 20,3 кг золота в месяц. На 1 кг золота расход сухого питательного бульона составит $8,2:20,3 = 0,4$ кг или 400 г, расход мелассы – 3,1 кг. Стоимость сухого бульона на 1 кг золота составит \$21,5, мелассы – \$4,1.

Расчет ориентировочной себестоимости золота, получаемого при чановом выщелачивании руды месторождения Бестобе с использованием участка биовыщелачивания. Для выщелачивания 83 т руды в сутки и 3000 т – в месяц при Т:Ж = 1:1,5 необходимо жидкой фазы 124,5 т в сутки и 4500 т – в месяц. Исходя из этих данных, были рассчитаны основные расходные коэффициенты по себестоимости золота. При этом предполагается, что в производственных условиях гидролизат рыбной муки будет заменен на местное сырье – мелассу. Поскольку на

мелассе возможно культивирование продуцентов аминокислот, то вместо дорогостоящего реагента аминокислоты в таблице 5 приведено количество мелассы, необходимое для культивирования таких бактерий.

Сравнение себестоимости 1 кг золота по основным статьям эксплуатационных затрат технологии биохимического выщелачивания и существующей технологии цианирования (без мероприятий по обезвреживанию и рекультивации отработанных хвостов и без учета распределения затрат) приведены в таблице 5.

При стоимости участка биохимического выщелачивания 100910 тыс. тенге (с ферментером и укомплектованной микробиологической экспресс лабораторией) срок его окупаемости составляет 3,1 года.

При стоимости золота \$1778 за тройскую унцию рентабельность переработки руды месторождения Бестобе методом чанового биохимического выщелачивания не вызывает сомнений.

Кроме золота из 3000 т руды после биохимического выщелачивания за месяц можно извлечь дополнительно около 50 кг молибдена и обогатить кек по титану на 30 % с последующим извлечением последнего смесью серной и соляной кислот. В кеке от месячного выщелачивания благородных и редких металлов будет содержаться 5,1 т титана. По результатам опытно-промышленных испытаний из кека можно извлечь 2,9 т титана, который выходит в основном при промывке.

Таблица 5 – Сравнительный анализ себестоимости 1 кг золота по биохимической (1) и обычной (2) технологии чанового выщелачивания

Статьи затрат	Расход, т на 3 000 т руды		Стоимость, тг/\$/т	Уровень затрат, \$/кг Au	
	1	2		1	2
1. NaCN	18,3	37,5	257850/1719	1549,6	4726,0
2. Меласса	3,1 кг		1333	0,2	–
3. NaOH	7,2 кг	7,2 кг	74379/495,86	0,176	0,26
4. Аминокислота (меласса)	3,1кг	–	125000/833,3 (1333)	308 (0,2)	–
5. Актив. уголь	0,9	0,9	347100/2314	102,6	152,7
6. Электроэнергия	18 000 кВт/ч	18 000 кВт/ч	\$0,06 /кВт·ч	53,2	79,2
Итого:					
Себестоимость 1 кг золота	–	–	–	2014,0	4958,2
Экономия по себестоимости за месяц	–	–	–	2944,2	–
Экономия по себестоимости за год	–	–	–	32386,2	–

Таблица 6 – Стоимость редких металлов при их извлечении из растворов и кеков биохимического выщелачивания при переработке 3000 т руды месторождения Бестобе

Металл	Источник извлечения	Степень извлечения, %	Стоимость		Стоимость после переработки руды за месяц, \$
			тг/кг	\$/кг	
Молибден	Раствор	24,8	4875,0	32,5	1625,0
Титан (ТГ-100)	Кек	57,2	2250,0	15,0	43500,0
Итого за месяц:					45125,0
Итого за год:					496375,0

В таблице 6 приведена стоимость редких металлов, которую можно получить за месяц дополнительно при их извлечении из растворов и кеков биохимического выщелачивания.

Как видно из данных таблицы комплексный подход к процессу выщелачивания позволяет значительно эффективнее использовать природные ресурсы. Извлечение редких металлов из практически бросовых материалов – кеков и обеззолоченных растворов позволяет значительно повысить экономическую эффективность биохимического выщелачивания.

Выводы. Таким образом, извлечение благородных и редких металлов из упорной руды месторождения Бестобе с использованием ком-

плексного выщелачивающего агента на основе гетеротрофных бактерий рентабельно для предприятия в целом. Переработка упорного сырья позволяет без предварительного обогащения увеличить извлечение благородных металлов на 20 % и дополнительно извлечь такие редкие металлы, как молибден и титан.

Как показали технико-экономические расчеты, экономия себестоимости 1 кг золота при использовании комплексного биохимического агента составляет \$32386,2 за год. При условии дополнительного извлечения за год молибдена и титана на сумму \$496375 общая прибыль от использования комплексного выщелачивающего агента составит \$528761,2 в год.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Tributsch H. Direct versus indirect bioleaching // *Hydrometallurgy*. – 2001. – P. 177-185.
- 2 Harrison Susan T.L., Becker Megan, van Hille Robert P. In situ investigation and visualization of microbial attachment and colonization in a heap bioleach environment: The novel biofilm reactor // *Miner. Eng.* – 2010. – Vol. 23, № 6. – P. 486-491.
- 3 Пат. 5332559 США. Biooxidation process for recovery of metal values from sulphur-containing ore materials / King J., David H. Newmont Mining Corp. Оpubл. 26.07.1994.
- 4 Пат. 5246486 США. Biooxidation process at heap leaching of gold from low grade sulfide and carbon-sulfide ore / King J., David H. Newmont Mining Corp. Оpubл. 21.09.1993.
- 5 Rojas-Chapana I.A., Tributsch H. Biochemistry of sulfur extraction in biocorrosion of pyrite by *Thiobacillus ferrooxidans* // *Hydrometallurgy*. – 2001. – 59, N 2-3. – P. 291-300.
- 6 Whitehead J.A. Application of 1 – alkyl-3methylimidazolium ionic liquids in the oxidative leaching of sulphidic copper, gold and silver ores // *Hydrometallurgy*. – 2007. – 88, № 1-4. – P. 109-120.
- 7 Torma A.E., Oolman T. Bioliberation of gold // *Int. Mater. Rev.* – 1992. – 37, № 4. – P. 187-193.

8 Clark M.E. Technological breakthroughs creating value // *Hydrometallurgy*. – 2006. – 83, № 1-4. – P. 9-26.

9 Jonson D.B. Importance of microbial ecology in development of new mineral technologies // *Hydrometallurgy*. – 2001. – 59, N 2-3. – P. 147-157.

10 Седельников Г.В., Савари Е.Е., Ким Д.Х. Использование биотехнологии – перспективный путь вовлечения в эксплуатацию месторождений с упорными рудами золота // *Горный журнал*. – 2006. – № 10. – С. 52-57.

11 Пат. 11409 РК. Штамм бактерий *Pseudomonas aureofaciens* «Т-10 ИМиО», растворяющий золото из сульфидсодержащих руд и концентратов / Кенжалиев Б.К., Абдраштова С.А., Абдуллина Г.Г., Игнатьев М.М., Абсалямов Х.К., Семенченко Г.В.; опубл. 15.04.02. Бюл. № 4.

12 Пат. 22781 РК. Способ переработки упорного золото-серебросодержащего сырья / Семенченко Г.В., Мукушева А.С., Беркинбаева А.Н.; опубл. 16.08.2010. Бюл. № 7.

REFERENCES

- 1 Tributsch H. *Hydrometallurgy*. 2001, 177-185 (in Eng.).
- 2 Harrison Susan T.L., Becker Megan, van Hille Robert P. *Miner. Eng.* 2010, 23, 6, 486-491 (in Eng.).

3 Pat. 5332559 USA. Biooxidation process for recovery of metal values from sulphur-containing ore materials. King J., David H. opubl. **26.07.1994** (in Eng.).

4 Pat. 5246486 USA. Biooxidation process at heap leaching of gold from low grade sulfide and carbon-sulfide ore. King J., David H. opubl. **21.09.1993** (in Eng.).

5 Rojas-Chapana I.A., Tributsch H. *Hydrometallurgy*. **2001**, 59, 2-3, 291-300 (in Eng.).

6 Whitehead J.A. *Hydrometallurgy*. **2007**, 88, 1-4, 109-120 (in Eng.).

7 Torma A.E., Oolman T. *int. Mater. Rev.* **1992**, 37, 4, 187-193 (in Eng.).

8 Clark M.E. *Hydrometallurgy*. **2006**, 83, 1-4, 9-26 (in Eng.).

9 Jonson D.B. *Hydrometallurgy*. **2001**, 59, 2-3, 147-157 (in Eng.).

10 Седельников Г.В., Савари Е.Е., Ким Д.Х. *Gornyi zhurnal*. **2006**, 10, 52-57 (in Russ.).

11 Pat. 11409 KZ. Shtamm bakterij *Pseudomonas aureofaciens* «T-10 IMiO», rastvoryayushchij zoloto iz sulfidoderzhashchikh rud i koncentratov. Kenzhaliev B.K., Abdrashitova S.A., Abdullina G.G., Ignat'ev M.M., Absalyamov H.K., Semenchenko G.V. opubl. **15.04.2002**, 4 (in Russ.).

12 Pat. 22781 KZ. Sposob pererabotki upornogo zoloto-serebrosoderzhashchego syr'ya. opubi. Semenchenko G.V., Mukusheva A.S., Berkinbaeva A.N. **16.08.2010**, 7 (in Russ.).

Түйіндеме

Табанды кендерден бағалы металдарды шығару үшін кешенді шаймаландыру ерітіндіні пайдаланудың негізінде биохимиялық шаймаландырудың технологиясы еңделді. Биохимиялық уәкіл құрамына: *Pseudomonas aureofaciens* атауымен шоғырлануда 108 кл/см³ «Т-10 ИМиО» патенттелген сұйық гетеротрофты бактериялар сонымен бірге амин қышқылы – 0,01 күйе 0,04 күйе, роданид 0,01 күйе және цианид – 0,1 күйе кірді. ТОО «НАЦ Биомедпрепарат» зертханаларында Бестөбе кенінде ұлғайтылған-лабораториялық және тәжірибе-өндірістік сынақтар технологиясы еткізілді. Шаймаландырудың шарты: рН 9, 8-10,0; қызу – 20-23 °С, күбіде араластыру – 100 айналым/минутына; К:С = 1:2. Шаймалану узақтығы 8-16 сағат, кейін кеннің құрамына байланысты және нәтиже қалауына сай шаймалану ерітіндісін 2-6 рет ауыстыру қажет. Тазартылған ерітінді қайырма соруға жіберіледі де, алтынсыздандырылған қалдық қоймаға тасталынады. Алтынның шығуы – 91 %, күмістің – 40 %. Салыстыру үшін алтынның Бестөбе кендерінде шығатын көлемі – 70 %. Ұлғайтылған – лабораториялық және тәжірибе – өндірістік сынақтарға қарай, алтынның биохимиялық шаймалануы мен игерушілік кешенді биохимиялық агентін Бестөбенің кенорнына ұсынуға болады, алтынның шығуын 20 %-ға көтеруі мүмкін, тағы қосымша сирек металдарды шығаруға болады (титан, молибден). Техника-экономикалық есептерге қарағанда 1 кг алтынның езіндік құны игерушілікте кешенді биохимиялық агентін жұмысқа қосқанда жылына – \$32386,2 үнем береді. Молибденнің және титанның жылына қосымша шығуын есептесек – \$496375, кешенді шаймалау уәкілін жұмсаған кезде жылына – \$528761,2 ортақ пайда жасалады. Өңделген технология табиғи экожүйелерге антропогендік жүктеменің төмендетуіне мүмкіндік туғызады және алтынның шығуын ұлғайтады

Түйін сөздер: кешенді биохимиялық шаймаландыратын уәкіл, асыл, сирек металдар.

Summary

The technology has been developed for extraction of precious metals from persistent ores by biochemical leaching with a complex leaching solution. Biochemical agent consisted of the following: liquid heterotrophic bacteria patented under the name of *Pseudomonas aureofaciens* «T-10 IMiO» in concentration of 108 cells/sm³, amino acid – 0,04 mol, thiocyanate – 0,01 mol and cyanide – 0,1 mol as well. The technology has passed the integrated-laboratory and trial tests in the industrial premises of the Company «NAC» Biomed-preparation» on Bestobe deposit's ore. The leaching conditions were: pH 9,8-10,0; temperature – 20-23 °C, hashing – 100 rpm; ratio S:L = 1:2. The duration of one leaching stage was 8-16 h, and then solution was changed on fresh one (in need of 2-6 times depending on ore content and desirable result). The clarified solution arrives on sorption, the gold less tailings – in tail storehouse. Gold extraction was 91 %, silver – 40 %. For comparison gold extraction on deposit Bestobe now is 70 %. The results of experimental-industrial tests enable to recommend biochemical leaching of gold with use of the complex biochemical agent on deposit Bestobe, that will enable to raise gold extraction to 20 %, and also in addition to extract rare metals from refractory ore (the titanium, molybdenum). In accordance with the technical and economic calculations, the annual saving of the cost price per 1 kg of gold at using the complex biochemical agent will be \$32 386,2. Under condition of additional extraction for year molybdenum and titanium to the amount of \$496 375 the general profit at complex leaching agent using will be \$528 761,2 per year. The developed technology will promote decrease of anthropogenic load on ecosystem and will increase through extraction of gold.

Key words: complex biochemical leaching agent, noble metals, rare metals.

Поступила 27.05.2014

