

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2024.i5.04>

Industrial application of bacterial iron oxidation in in-situ leaching technologies for uranium

E. Bektay, G. Turysbekova, B. Shiderin*, M. Bektayev

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: shbaur@mail.ru

Abstract. A technology for bacterial iron oxidation in the process of in-situ leaching of uranium has been developed and proposed for industrial use. The technology was validated by the results of pilot tests conducted at a uranium deposit in Kazakhstan over a period of 12 months. The aim of the study was to develop a technology for bacterial iron oxidation in the process of in-situ uranium leaching using a new type of flow bioreactor. Two biotechnological installations with bioreactors of 20 m³ volume were created and installed in 40-foot containers. The bioreactors, equipped with piping, air compressors, a pumping station, and control and measuring instruments, were installed at the geotechnical site and connected to the main in-situ uranium leaching system through wells. The installations had a productivity of over 150,000 m³/year for the leaching solution. After passing through the bioreactors, the redox potential of the solution increased from 360 mV to 430-450 mV in flow mode. The concentration of ferric iron increased from 0.1 g/L to 1.5 g/L and higher. The bacterial iron oxidation process was carried out at a solution temperature of 10 to 12°C (optimal temperature — 25-35°C), which allowed eliminating the costs of heating the solution. The test results showed an increase in uranium content in the productive solution by 10-20% after the leaching solution passed through the ore-bearing layer for 1 month. This confirmed the prospects for using this technology for in-situ well uranium leaching. The economic costs of using the technology are 6-8 times lower compared to using chemical oxidants such as hydrogen peroxide. The obtained industrial results open new prospects for the application of biotechnological methods for in-situ well leaching of uranium and other metals for the first time.

Keywords: uranium, in-situ leaching, in-situ, bioleaching, ferrous iron, ferric iron, nanoparticles, iron-oxidizing bacteria.

1. Введение

Использование технологии подземного скважинного *insitu* выщелачивания урана (ИСЛ) значительно развилось в мире за последние десятилетия. Успех Казахстана в добыче урана базируется на этой технологии (более 20 тысяч тонн урана в год). Снижение цены на уран требует внедрения технологий, направленных на уменьшение стоимости добычи и переработки урана, а также интенсификацию процессов.

Одним из подходов является применение бактериального выщелачивания с использованием бактерий, окисляющих железо, таких как *A. ferrooxidans*, которое по основным технологическим показателям соответствует режимам, применяемым для подземного скважинного *insitu* выщелачивания урана. Были предприняты неоднократные попытки использования биовыщелачивания для урана, однако эти методы не получили широкого распространения. Однократные подачи бактериального раствора не давали нужного результата, особенно учитывая, что в процессе подземного скважинного *insitu* выщелачивания урана раствор проходит через рудоносный слой в течение 20-30 дней. Условия для жизнедеятельности бактерий в рудоносном слое не позволяли им размножаться и проявлять свою активность.

Применение биогеотехнологий в горнодобывающей практике значительно отличается от использования био-

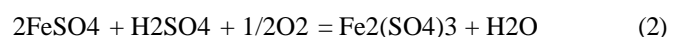
технологий в производстве лекарственных препаратов или пищевых продуктов. Это связано с существенной неоднородностью состава руды и наличием технологических факторов, которые оказывают значительное влияние на процесс. Необходимо учитывать сложную природу рудного тела, а также то, что материал меняется не только в разных блоках, но и внутри одного и того же блока.

1.1. Химия процесса воздействия бактериального окисления железа

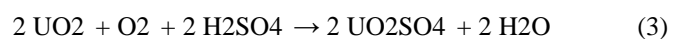
Химия процесса воздействия описана достаточно подробно в литературе. Трехвалентное железо, образующееся в результате окисления двухвалентного железа бактериями, выступает в роли окислителя для тетравалентного урана:



Образующееся в ходе окисления урана двухвалентное железо затем повторно окисляется тионными бактериями (например, *A. ferrooxidans*):



Также возможно прямое окисление урана бактериями (прямой механизм):



Бактерии, способные окислять железо (II), были впервые обнаружены в кислых водах угольных шахт США, а затем – в кислых водах медного карьера Биндхем (США) [1, 2]. Позднее подобные бактерии были найдены на руднике Рио Тинто в Испании, где медь выщелачивается уже около 300 лет. На территории России такие бактерии встречаются, например, в кислых шахтных водах сульфидных месторождений Урала, Алтая и Кольского полуострова [3].

Во время микробиологического выщелачивания бактерии окисляют сульфидные минералы, что приводит к образованию ионов трехвалентного железа и серной кислоты в водной фазе – набора реагентов, благодаря окислительно-восстановительным реакциям, которые окисляют U(IV) и образуют растворимый U(VI). Эта трансформация, обусловленная химической активностью микроорганизмов, лежит в основе биометаллургического процесса, который экономически оправдан для бедных и небалансовых руд и хвостов уранового производства (т.е. в тех случаях, когда стандартный процесс не применим) [1-3].

Первые исследования, которые подтвердили возможность коммерциализации бактериального выщелачивания урана из бедного сырья, были проведены в начале 1950-х годов. В 1952-1953 годах в Уржейрика (Португалия) началось промышленное использование версии этого процесса в виде кучного выщелачивания с применением железобактерий *A. ferrooxidans* [4, 5]. Позже процесс был реализован на руднике Эллиот-Лейк (Канада) с использованием раствора серной кислоты и сульфата железа (III) в качестве бактериальной среды [6, 7].

В ходе эксплуатации этих предприятий было установлено, что одним из основных факторов, определяющих эффективность бактериального выщелачивания урана, является содержание пирита в руде. Разложение этого минерала не только способствует поступлению окислителя и комплексообразующего агента в зону реакции, но и генерирует тепло. Поэтому руды из месторождений Восточной Канады, где пирит связан с ураном, удобны для переработки. Если пирита в руде недостаточно, его можно добавить [8].

Еще одним важным фактором является характер минерализации урана, так как его оксиды, фосфаты, сульфаты и карбонаты легко растворяются, в то время как силикатные формы сложно или вовсе не поддаются выщелачиванию [9]. Показатели биовыщелачивания также зависят от генезиса месторождения, который определяет тип и минералогические характеристики породообразующих минералов. Если эти породы имеют щелочной состав, это может привести к осаждению веществ, что снижает фильтрационную способность рудного слоя, через который просачивается раствор, и способствует образованию изолированных участков. В то же время наличие кислых пород снижает расход кислоты, которая в меньшей степени взаимодействует с минеральными примесями [9, 10].

Еще одним важным фактором является количество питательных веществ (добавляемых искусственно или извлекаемых из минералов), достаточное для роста бактериальной культуры. В частности, распространенным технологическим методом является добавление азота в процесс биоокисления в виде сульфата аммония в реак-

торы [11]. *A. ferrooxidans* устойчива к ионам металлов, таким как хром, медь, цинк, никель, торий, уран и ртуть. В то же время наличие некоторых металлов и органических соединений в окружающей среде (например, экстракты грибов) может блокировать процесс окисления пирита этим типом бактерий [4, 9].

Температура является параметром, определяющим разнообразие микробиологических популяций [12]. Наиболее подходящими для исследований и промышленного применения оказались умеренно термофильные бактерии, окисляющие железо и серу, изначально выделенные из шахтных вод и горячих источников, работающие при температуре 30-40 °C [13-15]. В этой температурной зоне наиболее важными микроорганизмами, подходящими для *insitu* выщелачивания урана из хвостохранилищ, являются грамотрицательные бактерии: сероокисляющие *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Acidithiobacillus caldus* и железобактерии *Leptospirillum ferrooxidans* и *Leptospirillum ferriphilum* [11].

Для популяции *A. ferrooxidans* оптимальные значения pH находятся в диапазоне 1,5-3, однако при значительном содержании пирита в руде это значение может снижаться до 1 или даже ниже [9]. Менее ацидофильные бактерии группы *Thiobacillus*, такие как *Thermithiobacillus tepidarius*, *T. aquaesulis*, *T. denitrificans*, *T. thioparus*, могут за 10 дней снизить pH до значений 1,4-1,6 [16]. Отвалы горнодобывающих предприятий с низким содержанием серы и высоким содержанием хлоридов, имеющие исходное значение pH 9, представляют собой среду для функционирования популяции бактерий *A. ferrooxidans* [17]; те же бактерии активны в дренажных растворах при pH = 7,2 [18].

Во всех процессах выщелачивания с участием ацидофильных бактерий важным параметром является степень насыщения раствора или пульпы кислородом. В условиях принудительного перемешивания падение концентрации кислорода ниже 0,5-1,0 мг/дм³ вызывает остановку процесса. Было показано, что использование принудительной аэрации (расход воздуха 8 т/т твердого вещества, коэффициент использования кислорода 25 %) значительно сокращает время выщелачивания при кучном бактериальном выщелачивании руд на нескольких месторождениях Австралии [19].

При этом популяция аэробных бактерий *A. ferrooxidans* способна расти на поверхности восстановленных неорганических серосодержащих минералов без кислорода, используя трехвалентное железо в качестве акцептора электронов [20]. Недостаток углекислого газа останавливает рост автотрофных бактерий и может резко снизить скорость и полноту их взаимодействия с сульфидными минералами [21].

Комплексное исследование руд месторождений Канады и Испании, где уран является частью кофинита, уранинита и других минералов, позволило установить, что на расход кислоты (меньший, чем при стандартном выщелачивании) влияет не только исходное содержание пирита, но и его соотношение с халькопиритом [6, 22]. Ряд исследований также установил оптимальные параметры процесса (pH, температура и время перемешивания) [3].

Важным моментом стало обнаружение колоний аэробных и анаэробных бактерий в отвалах двух немец-

ких заводов, содержащих 0,05 % урана и от 0,5 до 7 % карбонатов [23]. Результаты исследования этих отвалов показали, что на глубине 1,5–2,0 м более 99 % всех культур были представлены бактериями *Thiobacillus ferrooxidans* (*A. ferrooxidans*) [23]. Также было обнаружено присутствие бактерий, восстанавливающих серу, в урансодержащих шахтных водах на ряде бразильских предприятий [24].

На предприятии в Канаде Rio Algom был протестирован процесс периодического орошения стен очистных забоев кислотными шахтными водами; в результате в 1964-1965 годах было дополнительно извлечено около 57 тонн урана. В настоящее время на Rio Algom используется технология кучного бактериального выщелачивания урана.

С 1969 года на фабрике Agnew Lake в Канаде проводятся испытания бактериального выщелачивания урана из рудной массы в очистных забоях. Через восемь месяцев контакта с 50 тоннами руды извлечение урана в раствор составило 57 %. В настоящее время этот процесс используется в промышленном масштабе.

С 1984 года на фабрике Denison в Канаде были протестированы три варианта подземного выщелачивания урана с использованием бактерий *A. ferrooxidans*: использование шести колонн диаметром 0,6 м и высотой 3 м (с общим объемом загруженной руды 9 тонн), орошение очистных забоев и их полное затопление (после взрывного оголения руды) [25]. В последнем варианте раствор насыщался кислородом, и при необходимости добавлялся питательный элемент (15-20 мг/дм³ фосфорной кислоты). На фабрике Denison некоторые рудные тела содержат местные участки (диабазовые дайки), которые подверглись хлоритизации, что затрудняло обработку 4 миллионов тонн руды с использованием стандартного гидрометаллургического процесса. Испытания колонного варианта подземного бактериального выщелачивания хлоритизированной руды показали возможность извлечения до 70 % урана. Присутствие апатита в этой руде удовлетворяло потребность бактерий в питательных веществах. В течение 1988 года с помощью подземного выщелачивания на этом заводе было извлечено около 300 тонн урана (степень извлечения составила 69-86 %) при затратах свыше 25 миллионов долларов [10, 25]. С 1988 года, когда 90 очистных забоев находились на разных стадиях готовности, этот процесс был запущен в коммерческую эксплуатацию.

Другие примеры промышленного использования биовыщелачивания урана включают заводы, использующие кучный метод (Фигейра в Бразилии, Рейнджер в Австралии, Степногорский завод в Казахстане и Сен-Пьер во Франции) и скважинный метод (Олимпик-Дам и Беверли в Австралии) [8, 9, 26, 27]. Однако информация о данных проектах представлена в сжатом виде, и в настоящее время технология, по-видимому, не используется. Существуют данные, что биовыщелачивание используется в Китае для извлечения урана из хвостохранилищ [28-30].

Из данного анализа следует, что применение бактериального окисления железа и биотехнологических методов для подземного *insitu* выщелачивания урана ограничено, и отсутствуют примеры эффективной организации этого процесса.

1.2. Урановое месторождение

Семизбайское месторождение в Казахстане имеет сложную геологическую структуру с глубиной около 100 м. Эксплуатация рудника характеризуется высоким расходом серной кислоты из-за сложного вещественного состава руды. Процесс выщелачивания на месторождении Семизбай отличается относительно высоким содержанием двухвалентного железа в растворах выщелачивания (до 3 г/л), а накопление солей в растворе достигает 20-30 г/л.

Проблема повышения затрат на производство при относительно высоком содержании железа требовала инновационных подходов для снижения производственных расходов. Химический окислитель (перекись водорода) успешно используется, однако его применение ограничено высокой стоимостью химикатов. Альтернативой является бактериальное окисление железа, при котором конечным окислителем является кислород воздуха, а бактерии выступают в качестве катализатора процесса. Было проведено значительное количество лабораторных исследований, взяты пробы из насосных и инъекционных скважин. Наше специальное исследование показало, что бактерии, окисляющие железо, присутствуют повсеместно.

Лабораторные исследования подтвердили применимость бактериального окисления железа для усиления окислительно-восстановительного процесса раствора и превращения двухвалентного железа в трехвалентное в существующих системах выщелачивания рудника. Однако оставался открытым вопрос о том, как бактериальное окисление железа повлияет на содержание урана в продуктивном растворе.

Переход от лабораторных исследований к пилотному производству и последующему промышленному применению связан с рядом факторов, которые трудно моделировать в лабораторных условиях:

1. Состав растворов выщелачивания отличается от модельных составов, используемых для выращивания бактерий, главным образом значительным содержанием солей (до 25 г/л).

2. Содержание Fe²⁺ железа не превышает 3 г/л, тогда как в моделируемых условиях оно может достигать 10 г/л. Относительно низкое содержание двухвалентного железа в растворе требует более тонкой настройки технологии с учетом факторов масштаба.

3. Температура раствора (10-14°C) значительно отличается от оптимальной (25-35°C). Затраты на нагрев значительно выше потенциального эффекта от использования раствора при объемах потока выщелачивающего раствора (2000 м³/ч). Попытки довести температуру раствора до оптимальной для бактерий потребовали бы затрат, сравнимых со стоимостью готового продукта.

4. Условия эксплуатации биореакторов в проточном режиме отличаются от модельных лабораторных условий, даже если состав растворов совпадает.

5. Продолжительность прохождения растворов выщелачивания (более 20 дней) через рудоносный слой и разнообразие физических и химических процессов, происходящих в рудоносном слое.

Основной проблемой при реализации проекта такого масштаба является установление связи между работой установок бактериального окисления железа (БОЖ) и увеличением содержания урана в продуктивном растворе [31]. Моделирование сложных процессов, происходящих

в рудоносном слое, затрудняется изменчивостью вещественного состава рудоносного слоя и его изменениями по мере прохождения раствора через рудный слой на глубине 20-35 м и более, в зависимости от месторождения (на некоторых месторождениях более 700 м). Анализ результатов использования перекиси водорода (химического окислителя) на руднике Семизбай позволил выдвинуть ряд предположений о том, что активированный раствор выщелачивания после бактериального окисления железа в би.

Анализ результатов использования перекиси водорода (химического окислителя) на руднике Семизбай позволил выдвинуть ряд предположений о том, что активированный раствор выщелачивания после бактериального окисления железа в биореакторах повлияет на содержание урана в промывочной жидкости. Исследования, проведенные различными специалистами и нами в лабораторных условиях, показали перспективы использования бактериального окисления железа, при котором скорость окисления урана увеличивается в несколько раз. В такой ситуации только прямые испытания на отдельном участке позволяют понять и изучить влияние бактериального окисления железа на содержание урана в продуктивном растворе и определить перспективы этой технологии. Объемы подаваемого раствора для выщелачивания составляют в среднем от 30 до 50 м³/ч для отдельного блока месторождения. Необходимо было провести пилотные испытания на отдельной установке с расходом раствора более 20 м³/ч, что в годовом выражении составляет более 150 тысяч м³/год.

Для оценки промышленного применения технологии бактериального окисления железа (БОЖ) на урановом месторождении была разработана геотехнологическая модель, основанная на матричных балансах. Расчеты для уранового месторождения Семизбай показали следующее:

а) Объем активного раствора, используемого в циркуляции на этом месторождении при подаче раствора 2000 м³/ч, составляет около 800 тысяч – 1 миллиона м³ в год, при этом через рудоносный слой проходит до 14 миллионов м³ раствора.

б) При средней толщине рудоносного слоя около 10 м и наличии около 1000 (фактически до 1031) скважин, работающих на расстоянии 25 м друг от друга, обрабатывается около 6-8 миллионов м³ рудоносного слоя в этом подземном реакторе. Это общий объем «подземного реактора» для подземного *insitu* выщелачивания урана на этом месторождении.

в) Месторождение разделено на блоки, которые находятся на разных стадиях: кислотизации, активного или пассивного выщелачивания, в зависимости от периода разработки блока. В настоящее время используется около 30 таких блоков, где установлено динамическое равновесие.

д) Месторождение Семизбай представляет собой совокупность относительно независимых 30 подземных реакторов, каждый из которых обрабатывает рудоносный слой объемом около 200-300 тысяч м³ в год, при этом каждый блок содержит в среднем около 30 тысяч м³ раствора выщелачивания.

е) При таком подходе исследуемое урановое месторождение соответствует горнодобывающему предприятию с объемом переработки 1-2 миллиона тонн руды в год.

2. Материалы и методы

Для тестирования использовались две установки с компрессорной станцией (до 500 м³/ч каждая) и насосной станцией с производительностью до 40 м³/ч. Проточные биореакторы объемом 20 м³ обеспечивали свободный поток раствора с минимальным выносом бактерий из биореактора благодаря конструкции оборудования. Насосная станция с частотным преобразователем и накопительным резервуаром обеспечивала подачу раствора в основную сеть под давлением более 8 бар. После биореакторов активированный раствор выщелачивания подавался в нагнетательные скважины. Измерения содержания железа в растворе, серной кислоты, pH, окислительно-восстановительных показателей и содержания урана в продуктивном растворе проводились шахтной лабораторией в текущем режиме. Подача раствора в биореакторы регулировалась кранами на основе данных электромагнитных расходомеров типа «Omega». Разработка проекта установки и её монтаж были выполнены исследовательской лабораторией «БиоГеоТехнология золота, урана и полиметаллических руд» (Университет Сатпаева).

Предварительное накопление биомассы осуществлялось на среде Сильвестра-Лэнгмюра. Накопленную биомассу однократно загружали в биореакторы. В течение месяца биомасса накапливалась в биореакторах в режиме культивирования. Накопление биомассы проводилось в режиме барботаж с подачей воздуха компрессором. Раствор периодически обновлялся по мере перехода двухвалентного железа в трехвалентное состояние. Ежедневные измерения проводились в химической лаборатории шахты.

Тесты проводились в 2018-2019 годах. Раствор подавался на две установки под кодовыми названиями VOI-1 и VOI-2 (бактериальное окисление железа) с объемом подачи 15 м³/ч круглосуточно. С июня 2019 года только установка VOI-1 работала в проточном режиме. Через две недели обе установки были запущены вместе. Общий объем раствора, подаваемого на установку, составлял 30 м³/ч. Дополнительная подача серной кислоты не производилась.

Объем активированного раствора выщелачивания, подаваемого на установки, составлял 30 м³/ч, при этом общий объем подачи раствора в нагнетательные скважины достигал 40 м³/ч. Смешивание активированного раствора выщелачивания и водного раствора несколько снижало окислительно-восстановительный показатель раствора и содержание трехвалентного железа в растворе. Данные о содержании целевого металла в продуктивном растворе определялись в обычном режиме непосредственно сотрудниками шахты Семизбай [32].

3. Результаты и обсуждение

На графике представлены данные о содержании урана в продуктивном растворе с начала 2018 года. Стрелками указано время запуска установок подачи активированного раствора выщелачивания. Содержание серной кислоты в растворе для выщелачивания составляло 3,5-4,5 г/л. Испытания проводились без дополнительной подачи кислоты. Наблюдается явная тенденция к снижению содержания урана до начала работы установок. После включения второй установки и достижения подачи 30

м³/ч происходит устойчивый рост содержания урана в продуктивном растворе, что позволило предположить, что испытания достигли своей поставленной цели.

Учитывая, что время реакции системы на воздействие модифицированного раствора выщелачивания составляет не менее 20 дней, можно отметить, что увеличение содержания урана в продуктивном растворе произошло после запуска био-установок. Для отдельных скважин на блоке рост составил более 50 %, среднее значение по блоку было 10-20 %.

Испытания проводились без добавления серной кислоты. Условия, при которых происходит бактериальное окисление железа, соответствуют условиям подземного *in situ* выщелачивания урана по содержанию серной кислоты в растворе (от 3 г/л до 25 г/л), уровню pH (1,5-2,5), окислительно-восстановительному потенциалу (360 мВ и выше), температуре и другим технологическим параметрам. Мобильное исполнение био-установок в контейнерах позволяет перемещать оборудование на проблемные блоки для решения локальных задач. Полученные данные позволили определить несколько вариантов промышленного внедрения технологии на руднике. На основе проведенных испытаний было решено провести дополнительные исследования с добавлением «свободной» серной кислоты, что улучшит работу биореакторов в растворах выщелачивания. Испытания проводились в сложных природных условиях, при этом температура воздуха зимой достигала -40°C.

4. Выводы

1. Проведены исследования на одном из блоков уранового месторождения с промышленными объемами потока растворов выщелачивания. Исследования показали влияние окисления железа штаммами *A. ferrooxidans* в проточных биореакторах на содержание урана в продуктивном растворе, несмотря на сложный вещественный состав рудного тела. Усредненные показатели содержания урана в продуктивном растворе за год для данного блока подтвердили этот эффект.

2. Окислительно-восстановительный потенциал раствора увеличился с 360 мВ до 430-450 мВ в проточном режиме после прохождения раствора выщелачивания через биореакторы. Содержание трехвалентного железа возросло с 0,1 г/л до 1,5 г/л и выше.

3. Процесс бактериального окисления железа в растворе происходил при температуре раствора 10-12°C (оптимальная температура составляет 25-35°C), что позволило избежать затрат на подогрев раствора.

4. Результаты испытаний показали увеличение содержания урана в продуктивном растворе на 10-20 % после прохождения раствора выщелачивания через рудоносный слой.

5. Операционные затраты при использовании проточных биореакторов оказались в 6-8 раз ниже, чем при использовании химических окислителей (перекиси водорода).

6. Промышленные испытания подтвердили потенциал данной технологии, а также данные, полученные в лаборатории. Испытания позволили определить технологические параметры для реализации промышленной био-установки для обработки всего объема раствора выщелачивания на руднике и установить технологические требования к оборудованию для промышленного применения.

References / Литература

- [1] Kolmer, A., Templ, K. & Hinkl, M. (1950). Bakterii, okisljajushhie zhelezo, iz kisljy stochnyh vod nekotoryh ugol'nyh shah. *Zhurnal bakteriologii*, (59), 317-328. <https://doi.org/10.1128/jb.59.3.317-328.1950>
- [2] Briner, L., Bek, Dzh., Djevis, D. & Uilson, D. (1954). Mikroorganizmy v processe vyshhelachivaniya sul'fidnyh mineralov. *Pro-myshlennaja i inzhenernaja himija*, (46), 2587-2592. <https://doi.org/10.1021/ie50540a051>
- [3] Polkin, S.I., Adamov, E.V. & Panin, V.V. (1982). Tehnologija bakterial'nogo vyshhelachivaniya cvetnyh i redkih metal-lov. M.: Nedra
- [4] Brandl H. (2001). *Biotechnologija*. Wiley
- [5] Harrison, V., Gou, V., Ivarson, K. (1966). Vyshhelachivanie urana iz rudy mestorozhdenija Jelliot Lejk v prisutstvii bakterij. *Kanadskij mineralogicheskij zhurnal*, (87), 64-67
- [6] Hamidian, H., Rezai, B. & Milani, S. (2009). Mikrobnoe vyshhelachivanie uranovoj rudy. *Aziatskij zhurnal himii*, (21), 5808-5820
- [7] Guaj, R., Sil'ver, M. & Torma, E. (1976). Mikrobiologicheskoe vyshhelachivanie nizkosortnoj uranovoj rudy bakterijami *Thiobacillus ferrooxidans*. *Prikladnaja mikrobiologija i biotechnologija*, (3), 157-167
- [8] Tuovinen O., Bhatti T. (1999). Mikrobiologicheskoe vyshhelachivanie uranovyh rud. *Metallurgicheskie i mineral'nye processy*, (16), 51-60. <https://doi.org/10.1007/BF03403234>
- [9] Mun'os H., Gonsales F., Blazkes M., Ballester A. (1995). Issledovanie biovyshhelachivaniya uranovoj rudy Ispanii. Chast' I: Obzor bakterial'nogo vyshhelachivaniya uranovyh rud. *Gidrometallurgija*, (38), 39-57. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(94\)00039-6](https://doi.org/10.1016/0304-386X(94)00039-6)
- [10] Roulings, D. (2004). Chistaja i prikladnaja himija.
- [11] Roulings, D. (2005). Harakteristiki i adaptacija mikroorganizmov, okisljajushhij zhelezo i seru, dlja izvlechenija metallov iz mineralov i ih koncentratov. *Mikrobnye kle-tochnye fabriki*, (4), 15
- [12] Kavatra, S., Nataradzhan, K. (2001). Mineral'naja biotechnologija: mikrobnye aspekty obogashhenija mineralov, izvlechenija metallov i jekologicheskogo kontrolja. *SME*, 101-119
- [13] Brajerli, Dzh. (1978). Termofil'nye bakterii, okisljaju-shhie zhelezo, obnaružennye na svalkah mednyh vyshhelachiva-nij. *Prikladnaja i jekologicheskaja mikrobiologija*, (36), 523-525. <https://doi.org/10.1128/aem.36.3.523-525.1978>
- [14] Brajerli, Dzh., Norris, P., Kelli, D. & LeRu, N. (1978). Harakteristiki umerenno termofil'nyh i acidofil'nyh zhelezookisljajushhij *Thiobacillus*. *Evropejskij zhurnal prikladnoj mikrobiologii*, 291-299
- [15] Holms, D. (1988). Biotechnologija v gornoj promyshlennosti i metallurgicheskoy pererabotke: vyzovy i vozmožnosti. *Metallurgicheskie i mineral'nye processy*, (5), 49-56
- [16] Blje, Zh., Tjagi, R., Men'e, N. & Okljer, Zh. (1994). Proizvodstvo vnekletochnyh otrostkov vo vremja bakterial'noj kolonizacii jelementnoj sery. *Processnaja biohimija*, (29), 475-482
- [17] Tvardovska, I. (1986). Rol' *Thiobacillus ferrooxidans* v okislenii pirita na ugol'nyh svalkah. I: Model'nye is-sledovanija. *Acta Microbiol. Pol.*, (35), 291-304
- [18] Tvardovska, I. (1987). Rol' *Thiobacillus ferrooxidans* v okislenii pirita na ugol'nyh svalkah. II: Issledovanie obrazcov, vzjatyh so svalk. *Acta Microbiol. Pol.*, (36), 101-107
- [19] Brajerli, K., Briggs, A. (2002). Vybory i raschet oborudovaniya i shem biookislenija. *Dizajn, praktika i kontrol' mi-neral'nyh predpriyatij*, 2002, 1540-1568
- [20] Pronk, J., de Brjujn, J., Bos, P. & Kjunen, Dzh. (1992). Anajerobnyj rost *Thiobacillus ferrooxidans*. *Prikladnaja i jekologicheskaja mikrobiologija*, (58), 2227-2230. <https://doi.org/10.1128/aem.58.7.2227-2230.1992>
- [21] Barrett, Dzh., H'juz, M., Karavajko, G. & Spenser, P. (1993). Izvlechenie metallov putem bakterial'nogo okislenija mi-neralov. Ellis Harwood, 127-134

- [22] Serda, H., Gonsales, S., Rios, H. & Kintana, T. (1993). Bio-proizvodstvo uranovykh koncentratov v Ispanii: primer issledovaniya. *FEMS Microbiol. Rev.*, (11), 253–260
- [23] Shippers, A., Hall'mann, R. & Vencien, S. (1995). Mikrob-noe raznoobrazie v othodakh uranovykh shaht. *Prikladnaya i jekologicheskaja mikrobiologija.*, (61), 2930–2935. <https://doi.org/10.1128/aem.61.8.2930-2935.1995>
- [24] Benedetto, Dzh., de Almeida, S., Gomes, H. & Vazoller, R. (2005). Monitoring sulfatvosstanavlivajushhih bakterij v kisljode uranovykh shaht. *Mineral'noe inzhenernoe delo*, (18), 1341–1343. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.08.012>
- [25] MakKridi, R., Guld, V. (1990). Biovyshhelachivanie urana. Vostanovlenie mikrobnnyh mineralov. McGraw-Hill, N'ju-Jork, 107–126
- [26] Garsija Dzhunior O. (1993). Bakterial'noe vyshhelachivanie uranovoj rudy iz Figejra, Parana, Braziliya: laborator-nye i pilotnye issledovaniya. *FEMS Microbiol. Rev.*, (11), 237–242. [https://doi.org/10.1016/0168-6445\(93\)90047-D](https://doi.org/10.1016/0168-6445(93)90047-D)
- [27] Dvivedi, K., Mathur, A. (1995). Biovyshhelachivanie – nash opyt. *Gidrometallurgija*, (38), 99–109. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(94\)00034-Z](https://doi.org/10.1016/0304-386X(94)00034-Z)
- [28] Czjango, Z., Shaocin, Ch., Sun', R. & Czin, C. (2004). Analiz i ocenka vody iz neskol'kih rajonov pererabotki urana, obrabotka zhidkih stochnyh vod s uranovykh shaht i zavodov. IAEA-1419, Vena
- [29] Kampbell, K., Gallegos, T. & Landa, Je. (2015). Biogeohimicheskie aspekty uranovoj mineralizacii, dobychi, pererabotki i rekul'tivacii. *Prikladnaja geohimija*, (57), 206–235. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.07.022>
- [30] Uotling, H. (2015). Obzor biogidrometallurgicheskogo izvlechenija metallov iz polimetallicheskikh mineral'nyh resursov. *Minerals*, 5(1), 1–60
- [31] Bektai, E.K., Turysbekova, G.S., Meretukov, M.E. & Bektai, M.E. (2018). Prirodnye nanochasticy i nanostruktury. Almaty, KazNTU

Уранды жерасты шаймалау технологияларында темірдің бактериялық тотығын өнеркәсіптік қолдану

Е. Бектай, Г. Турысбекова, Б. Шидерин*, М. Бектаев

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Корреспонденция үшін автор: shbaur@mail.ru

Андатпа. Қазақстандағы уран кен орнында 12 ай бойы жүргізілген пилоттық сынақтардың нәтижелерімен расталған жер асты (insitu) уранды шаймалау процесінде темірді бактериялық тотықтыру технологиясы әзірленіп, өнеркәсіптік қолдануға ұсынылды. Зерттеудің мақсаты – жаңа типті ағынды биореакторларды пайдалана отырып, жер асты «insitu» уранды шаймалау процесінде темірді бактериялық тотықтыру технологиясын әзірлеу болды. Сыйымдылығы 20 м³ екі биотехнологиялық қондырғы құрылып, 40 футтық контейнерлерге орнатылды. Геотехнологиялық полигонға қойылған биореакторлар құбыр жүйесімен, ауа компрессорларымен, сорғы станциясымен және бақылау-өлшеу құралдарымен жабдықталып, ұңғымалар арқылы уранды жер асты шаймалау жүйесіне қосылды. Қондырғылардың өнімділігі шаймалау ерітіндісі үшін жылына 150 000 м³-ден асты. Ерітінді биореакторлардан өткеннен кейін, тотығу-қалпына келтіру потенциалы 360 мВ-тан 430-450 мВ-қа дейін артты. Үш валентті темірдің мөлшері 0,1 г/л-ден 1,5 г/л және одан жоғары деңгейге дейін өсті. Темірді бактериялық тотықтыру процесі ерітінді температурасы 10-12°C кезінде жүргізілді (оңтайлы температура – 25-35°C), бұл ерітіндіні жылытуға кететін шығындарды болдырмауға мүмкіндік берді. Сынақ нәтижелері шаймалау ерітіндісі уран қабатынан бір ай бойы өткеннен кейін өнімді ерітіндідегі уран мөлшерінің 10-20% артқанын көрсетті. Бұл технологияның жер асты ұңғымалы insitu уранды шаймалау үшін перспективалы екенін растады. Технологияны қолданудың экономикалық шығындары химиялық тотықтырғыштарды, мысалы, сутегі асқын тотығын пайдалану шығындарынан 6-8 есе төмен. Алынған өнеркәсіптік нәтижелер алғаш рет биотехнологиялық әдістерді жер асты ұңғымалы insitu уранды және басқа да металдарды шаймалау үшін қолданудың жаңа мүмкіндіктерін ашты.

Негізгі сөздер: уран, жер асты шаймалау, insitu, биошаймалау, екі валентті темір, үш валентті темір, нанобөлшектер, темір тотықтырғыш бактериялар.

Промышленное использование бактериального окисления железа в технологиях подземного выщелачивания урана

Е. Бектай, Г. Турысбекова, Б. Шидерин*, М. Бектаев

Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: shbaur@mail.ru

Аннотация. Разработана и предложена для промышленного использования технология бактериального окисления железа в процессе подземного (insitu) выщелачивания урана. Технология была подтверждена результатами пилотных испытаний на урановом месторождении в Казахстане в течение 12 месяцев. Целью исследования являлась разработка технологии бактериального окисления железа в процессе подземного «insitu» выщелачивания урана с использованием нового типа проточных биореакторов. Были созданы две биотехнологические установки с биореакторами объемом 20

м³, установленные в 40-футовых контейнерах. Биореакторы, оснащенные обвязкой, воздушными компрессорами, насосной станцией и контрольно-измерительной аппаратурой, были установлены на геотехнологическом полигоне и подключены к основной системе подземного выщелачивания урана через скважины. Производительность установок составила более 150 000 м³/год для выщелачивающего раствора. После прохождения раствора через биореакторы, окислительно-восстановительный потенциал раствора увеличился с 360 мВ до 430-450 мВ в проточном режиме. Содержание трехвалентного железа увеличилось с 0,1 г/л до 1,5 г/л и выше. Процесс бактериального окисления железа проводился при температуре раствора от 10 до 12°C (оптимальная температура — 25-35°C), что позволило исключить затраты на нагрев раствора. Результаты испытаний показали увеличение содержания урана в продуктивном растворе на 10-20 % после прохождения выщелачивающего раствора через рудоносный слой в течение 1 месяца. Это подтвердило перспективность использования данной технологии для подземного скважинного *insitu* выщелачивания урана. Экономические затраты на применение технологии в 6-8 раз ниже по сравнению с использованием химических окислителей, таких как пероксид водорода. Полученные промышленные результаты впервые открывают новые перспективы для применения биотехнологических методов подземного скважинного *insitu* выщелачивания урана и других металлов.

Ключевые слова: уран, подземное выщелачивание, *insitu*, биовыщелачивание, двухвалентное железо, трехвалентное железо, наночастицы, бактерии, окисляющие железо.

Received: 17 July 2024

Accepted: 15 October 2024

Available online: 31 October 2024