

Д. С. БАЛПАНОВ, О. А. ТЕН, Н. К. ЖАППАР, В. М. ШАЙХУТДИНОВ, Р. А. ХАННАНОВ*

Научно-аналитический Центр «Биомедпрепарат», Степногорск, Казахстан,

*e-mail: khanrinat@mail.ru

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ТРЕХВАЛЕНТНОГО ЖЕЛЕЗА И СОРБЦИИ РЕДКИХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ЦИРКУЛИРУЮЩИХ РАСТВОРОВ ПОДЗЕМНО-СКВАЖИННОЙ ДОБЫЧИ УРАНА

Резюме: Статья посвящена актуальным вопросам гидрометаллургии, в частности внедрению биотехнологических методов в практику подземно-скважинного выщелачивания урана. В работе описаны психротолерантные (хладостойчивые) штаммы хемолитотрофных микроорганизмов *Acidithiobacillus ferrivorans* SU-4, UZ-1, UZ-2, UZ-3, способные окислять ионы закисного железа (Fe^{2+}) в окисное (Fe^{3+}) и тем самым повышать окислительно-восстановительный потенциал технологического раствора, закачиваемого в пласт. Данные микроорганизмы могли бы стать хорошей альтернативой применяемым в настоящее время окислителям, как с экономической, так и с экологической стороны. Применение биотехнологического способа имеет еще один немаловажный положительный аспект - урановые руды содержат ассоциации редких (РМ) и редкоземельных (РЗМ) металлов в количествах, допускающих промышленную добычу. В качестве модельного объекта исследовались технологические растворы месторождения Семизбай У (Акмолинская область), содержащие селен, германий и скандий. В работе были исследованы различные микроорганизмы, способные к биосорбции и биоаккумуляции РМ и РЗМ, три из которых были отобраны как потенциальные биосорбенты, а также из них был создан консорциум. На основе микроорганизмов *Rhizopus* sp. FZ-1, *Monoraphidium* sp. CZ и *Pseudomonas putida* KS28 составлен консорциум с соотношением FZ-1 : CZ : KS28 равным 1:3:2, способный сорбировать и аккумулировать 196, 95 и 71 мг/г селена, германия и скандия, соответственно. Таким образом, дальнейшее совершенствование биотехнологии в гидрометаллургии позволит существенно повысить рентабельность действующих месторождений и снизить экологическую нагрузку на регионы с интенсивным горнорудным производством.

Ключевые слова: подземно-скважинное выщелачивание урана, биотехнология, биосорбция, редкие и редкоземельные металлы, хемолитотрофные микроорганизмы

Введение. Казахстан располагает уникальной минеральной базой. В Республике сосредоточена примерно пятая часть мировых запасов урана. Общие ресурсы урана составляют порядка 1,5 млн. тонн, или 20-25 % всех мировых запасов, из них около 1,1 млн. тонн можно добывать методом подземного выщелачивания [1]. В течение последних 40 лет в Казахстане осуществлялась разработка более 20-ти урановых месторождений, и за этот период было добыто около 40 % урана бывшего СССР. Бывшая Северо-Казахстанская урановорудная провинция расположена на территории Акмолинской и Северо-Казахстанской областей. Здесь сосредоточены 34 месторождения и 19 рудопроявлений урана. Коммерческой реализацией урана в стране занимается образованная в 1997 г. Национальная атомная компания «Казатомпром» [2].

В связи с ужесточением законодательства в области охраны окружающей среды многие уранодобывающие компании переходят на гидрометаллургические способы недропользования. Одним из таких способов является подземно-скважинное выщелачивание, являющееся одним из самых рентабельных и экологически чистых способов добы-

чи урана, не требующих ни карьеров, ни шахт [3]. Предварительная подготовка идёт непосредственно под землёй, что существенно минимизирует радиоактивные выбросы. Способ применим в тяжелых климатических условиях и условиях вечной мерзлоты. В основе подземно-скважинного выщелачивания урана лежит принцип вымывания серноокислыми растворами ионов шестивалентного урана из вмещающих пород. Растворенный уран извлекают из продуктивных растворов с помощью сорбции. Преимущественно происходит серноокислотное растворение шестивалентных окислов урана, но также имеет место и пассивное окисление четырёхвалентного оксида урана растворённым кислородом. Поэтому активно исследуются методы, повышающие окислительно-восстановительный потенциал серноокислотных выщелачивающих растворов. Одним из широко распространённых в природе окислителей являются ионы трехвалентного железа. Однако применение серноокислых растворов трехвалентного железа сопряжено с проблемой его регенерации. В результате инфильтрации через рудное тело происходит окисление, как четырёхвалентного

урана, так и окисление сульфидных минералов вмещающих пород, что в итоге приводит к накоплению ионов двухвалентного железа. Существуют методы химической регенерации. В настоящее время широко применяется пероксид водорода в качестве агента для окисления ионов двухвалентного железа. В силу, как экономических (удорожание стоимости реактива, высокой коррозионности и, как следствие, быстрого износа оборудования), так и экологических факторов, встал вопрос об альтернативных способах регенерации. Другим способом окисления образующегося закисного железа является использование кислорода и кислородсодержащих газов (воздуха) [4]. Несмотря на низкую стоимость кислорода, серьезным препятствием для успешного применения данного способа является низкая растворимость кислорода в воде и высокая взрывоопасность применения. Поэтому представляется актуальным применение биотехнологического способа регенерации ионов трехвалентного железа.

В основе биотехнологического способа регенерации ионов трехвалентного железа лежит способность тионовых бактерий окислять ионы двухвалентного железа до трехвалентного состояния.

Применение биотехнологического способа имеет еще один немаловажный положительный аспект - урановые руды содержат ассоциации редких и редкоземельных металлов в количествах, допускающих промышленную добычу. В ходе проведенных работ по изучению элементного состава и оценке геохимического спектра более 30 месторождений было установлено, что урановые месторождения характеризуются высоким содержанием редкоземельных элементов (РЗМ), редких металлов (РМ) и золота. В них преимущественно накапливаются легкие лантоноиды (лантан, церий), среди редких металлов преобладают гафний и сурьма. Максимальное содержание тяжелых лантоноидов (иттербий, лютеций) отмечается в месторождениях Заозерное и Тастыкольское Коксенгирского рудного узла [5]. В ходе сернокислотного вымывания урана из вмещающих пород происходит попутное растворение и других металлов, в том числе редких и редкоземельных, попутное извлечение которых даст дополнительный источник дохода.

В восьмидесятых годах XX века стали накапливаться данные о способности бактерий, грибов и микроводорослей сорбировать либо аккумулировать редкоземельные элементы. В частности в исследовании [6] показана способность избирательной сорбции ионов лантана штаммом

Pseudomonas aeruginosa МТСС-1223. Грамм сухой биомассы сорбировал до 1000 мкмоль лантана. Высокие сорбирующие свойства выявлены у дрожжевых культур. Так штамм *Saccharomyces cerevisiae* Brewery сорбировал до 650 мкмоль лантана на грамм сухой биомассы [7]. В основе механизма микробиологической сорбции лежит способность ионов металлов взаимодействовать с клеточными структурами микроорганизмов. Механизм сорбции существенно отличается в зависимости от таксономического положения микроорганизма. Стоит отдельно отметить биоаккумуляцию металлов микроорганизмами. Биоаккумуляция – способность микроорганизмов аккумулировать ионы металлов либо в межплазматическом пространстве, либо в виде телец включений [8]. Данное явление свойственно исключительно живым организмам и, как следствие, имеет на порядок большую избирательность.

Биосорбенты нашли большое применение в природоохранной индустрии в качестве недорогого материала для очистки сточных вод [8]. Вместе с этим видится перспективным использование биосорбентов для извлечения РМ и РЗМ из продуктивных растворов урановых месторождений. Особенно многообещающей видится перспектива использования биосорбентов в контексте успешного применения биотехнологии для регенерации трехвалентного железа, поэтому будет создана интегрированная технология биосорбции и бактериальной регенерации технологических растворов, применяемых при подземно-скважинном выщелачивании урана. Подобная интеграция существенно повысит рентабельность производства, не потребует значительных изменений в существующей технологии при минимальных эксплуатационных затратах и нагрузке на окружающую среду.

Таким образом, уранодобывающая промышленность Казахстана может таить дополнительный источник дохода и стать успешным примером диверсификации экономики. Внедрение дополнительных методов переработки сырья позволит существенно повысить экономическую привлекательность многих месторождений и снизить нагрузку на экологию.

Целью работы является поиск биологических окислителей ионов двухвалентного железа, а также сорбентов на основе биомассы бактерий.

Экспериментальная часть. Объектами исследования являются железо- и сероокисляющие микроорганизмы *Acidithiobacillus ferrivorans*, микроводоросли *Monoraphidium sp* и грибы *Rhizopus sp*, мицелиарные грибы *Beauveria bassiana*, грамм

положительные бактерии рода *Rhodococcus* и *Bacillus*, грамм отрицательные бактерии *Escherichia coli* и *Pseudomonas putida*, указанные штаммы были любезно предоставлены коллекцией микроорганизмов филиала «Национальный центр биотехнологии» г. Степногорск.

Так же объектами исследования для биосорбции РМ и РЗМ были синтетические растворы, по химическому составу близкие к маточным растворам пескоотстойников месторождения Семизбай У.

Культивирование микроорганизмов. Культивирование хемолитотрофных бактерий проводили на питательных средах Ваксмана и Сильвермана и Люндгрена 9К [9] при температуре 10 °С и перемешивании при скорости вращения мешалки 200 об/мин; сине-зеленых микроводорослей – на питательной среде BG-11 [10]; плесневых грибов – на среде Чапека-Докса [11].

Модельные синтетические растворы для оценки биосорбции РМ и РЗМ. Модельные растворы были получены путем растворения диоксида селена, диоксида германия и оксида скандия в 0,1М растворе серной кислоты.

Метод биосорбции РМ и РЗМ. Выращенную на элективных средах биомассу выделяли из раствора центрифугированием при 9000 об/мин в течение 10 мин. Супернатант сливали и клетки ресуспендировали в дистиллированной воде для полного удаления среды. Полученную биомассу высушивали при 55 °С и использовали для проведения биосорбции. Эксперименты по биосорбции были проведены при начальной концентрации металлов 100 мг/дм³ и 100 мг сорбента в 100 мл раствора металла при 25 °С

Методы исследования. Величину рН (Eh) определяли с помощью анализатора Mettler Toledo Seven Multi S47-K.

Концентрацию ионов Fe³⁺ и Fe²⁺ в жидкой фазе определяли спектрофотометрическим методом на колориметре КФК-2 [12].

Содержание металлов в растворах и твердых образцах определяли методами атомно-адсорбционной и атомно-эмиссионной спектрометрии на спектрометрах AAnalyst 300 Perkin Elmer и iCAP 7200 ICP-OES Analyzer фирмы ThermoScientific [13]. С помощью атомно-адсорбционной и атомно-эмиссионной спектрометрии определяли содержание РМ и РЗМ в насыщенном биосорбенте

Результаты и их обсуждение. Составление консорциума психротолерантных железозакисляющих микроорганизмов. Температура технологических растворов подземно-скважинного

выщелачивания (ПСВ) урана не превышает 14 °С даже в летние дни. В связи с этим для регенерации ионов трехвалентного железа, являющихся окислителем четырехвалентного урана, необходимо применение психротолерантных бактерий, сохраняющих высокую окислительную активность в условиях холодных растворов ПСВ.

С целью создания консорциума психротолерантных микроорганизмов проведен отбор бактерий, обладающих наибольшей скоростью окисления двухвалентного железа в трехвалентное при температуре 10 °С.

Скрининг осуществляли среди коллекционных психротолерантных серо- и железозакисляющих микроорганизмов *Acidithiobacillus ferrivorans* SU-1; SU-2; SU-3; SU-4; SU-5; SU-6 и выделенных *Acidithiobacillus ferrivorans* UZ-1, *Acidithiobacillus ferrivorans* UZ-2 и *Acidithiobacillus ferrivorans* UZ-3. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Скорость окисления железа различными штаммами при температуре 10 °С

Штамм	Скорость окисления Fe ²⁺ , г/дм ³ ·ч
<i>Acidithiobacillus ferrivorans</i> SU-1	0,024
<i>Acidithiobacillus ferrivorans</i> SU-2	0,019
<i>Acidithiobacillus ferrivorans</i> SU-3	0,021
<i>Acidithiobacillus ferrivorans</i> SU-4	0,039
<i>Acidithiobacillus ferrivorans</i> SU-5	0,027
<i>Acidithiobacillus ferrivorans</i> SU-6	0,016
<i>Acidithiobacillus ferrivorans</i> UZ-1	0,033
<i>Acidithiobacillus ferrivorans</i> UZ-1	0,042
<i>Acidithiobacillus ferrivorans</i> UZ-3	0,054

На основе полученных данных для создания консорциума были выбраны штаммы со скоростью окисления Fe²⁺ > 0,030 г/дм³·ч SU-4, UZ-1, UZ-2, UZ-3. Потому что данная скорость окисления позволяет растворам циркулировать в технологическом контуре месторождения ПСВ урана в зимний период не замерзая без дополнительного подогревания. В дальнейших экспериментах по созданию биореактора-бассейна в качестве инокулянта использовались несколько штаммов. Биореакторы-бассейны, в которых использовалась монокультура каждого представленного штамма уступали по эффективности биореактору, в котором присутствовали в инокулянте все перечисленные штаммы.

Составление консорциума микроорганизмов, способных сорбировать и аккумулировать РМ и

РЗМ. В качестве сопутствующих элементов в урановых рудах месторождения Семизбай U (Акмолинская область) содержатся селен, германий и скандий.

В связи с тем, что кислотность растворов при сернокислотном подземно-скважинном выщелачивании урана поддерживается в диапазоне pH 1,0-2,0, необходимо было разработать сорбент, эффективно извлекающий целевые металлы при высокой кислотности. С этой целью среди имеющихся в коллекции микроорганизмов был проведен скрининг на наличие высокой сорбционной емкости селена, германия и скандия при pH 2,0. Результаты проведенного скрининга представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты сорбции селена, германия и скандия различными микроорганизмами при pH 2,0

Микроорганизм	Сорбционная емкость, мг/г		
	Se	Ge	Sc
<i>Monoraphidium</i> sp. CZ	108	123	29
<i>Rhizopus</i> sp. FZ-1	174	89	37
<i>Rhizopus</i> sp. FZ-2	162	93	33
<i>Bacillus</i> sp. 2-A	91	47	25
<i>Escherichia coli</i> K12F	74	68	13
<i>Rhodococcus</i> sp. 65	97	114	42
<i>Beauveria bassiana</i> Б-3	24	75	19
<i>Pseudomonas putida</i> KS28	23	51	69

Из данных таблицы 2 видно, что при кислотности раствора pH 2,0 наибольшей сорбционной емкостью по селену обладает биомасса грибов *Rhizopus* sp. FZ-1 – 174 мг/г, по германию – *Monoraphidium* sp. CZ – 123 мг/г, по скандию – *Pseudomonas putida* KS28 – 69 мг/г. Для комплексного извлечения селена, германия и скандия необходимо, чтобы в состав сорбента входили три данных микроорганизма.

С целью разработки сорбента, обеспечивающего максимальное извлечение целевых металлов, проведены исследования сорбции селена, германия и скандия при различных соотношениях биомасс *Rhizopus* sp. FZ-1 : *Monoraphidium* sp. CZ : *Pseudomonas putida* KS28. Эксперименты проводили с растворами, содержащими по 100 мг/дм³ катионов металлов селена, германия и скандия. Результаты представлены на рисунке 1 и таблице 3. Всего было поставлено 64 эксперимента, на рисунке представлено 17 из них.

Как видно из представленных данных, наибольшее извлечение металлов из раствора достигнуто при соотношении биомасс *Rhizopus* sp. FZ-1 : *Monoraphidium* sp. CZ : *Pseudomonas putida* KS28, равном 1:3:2. При данном соотношении микроорганизмов сорбционная емкость по селену, германию и скандию составила 196, 95 и 71 мг/г, соответственно.

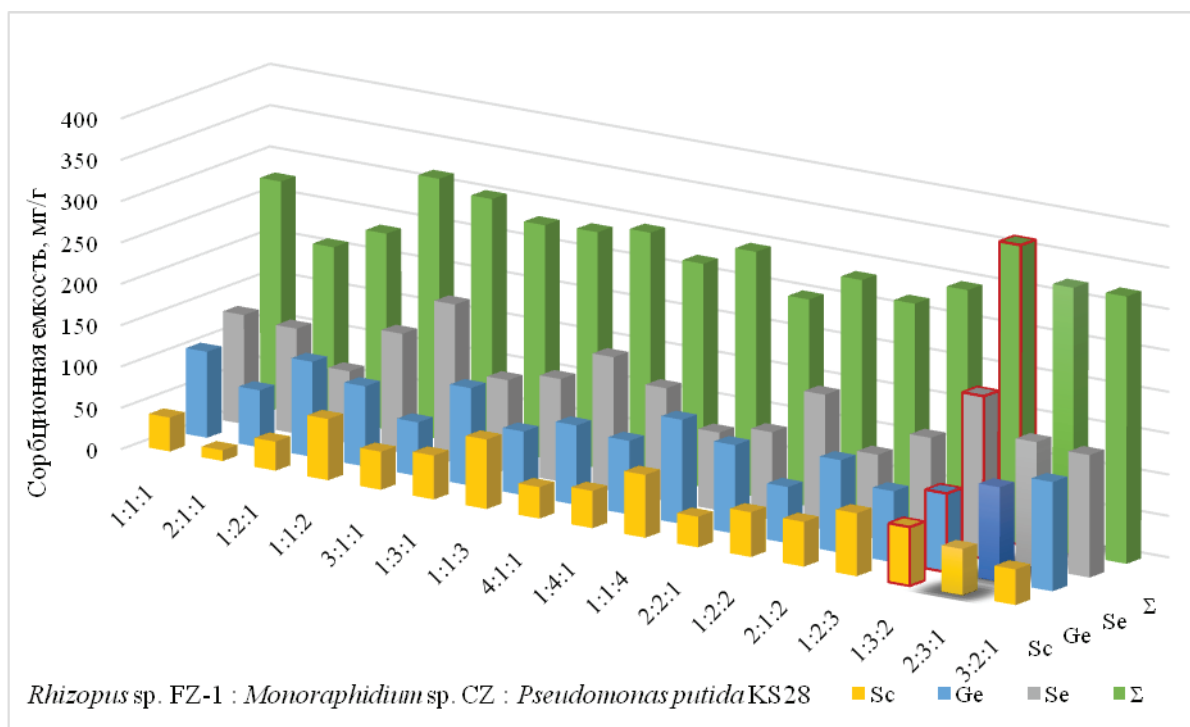


Рисунок 1 – Зависимость сорбционной емкости сорбента от соотношения биомасс *Rhizopus* sp. FZ-1 : *Monoraphidium* sp. CZ : *Pseudomonas putida* KS28

Таблица 3 – Сорбционная емкость, мг/г биосорбента при различных соотношениях *Rhizopus* sp. FZ-1 : *Monoraphidium* sp. CZ : *Pseudomonas putida* KS28

Металл	Соотношение биомасс <i>Rhizopus</i> sp. FZ-1 : <i>Monoraphidium</i> sp. CZ : <i>Pseudomonas putida</i> KS28															
	1:1:1	2:1:1	1:2:1	1:1:2	3:1:1	1:3:1	4:1:1	1:4:1	1:1:4	2:2:1	1:2:2	2:1:2	1:2:3	1:3:2	2:3:1	3:2:1
Sc	41	13	35	74	46	53	38	45	76	37	54	54	76	71	56	43
Ge	104	69	115	97	65	118	96	89	126	107	68	112	86	95	114	132
Se	132	127	87	144	191	111	162	136	94	106	163	102	134	196	152	148
Σ	277	209	232	315	302	282	296	270	296	250	285	268	296	362	322	323

Выводы. Биотехнологический способ регенерации трёхвалентного железа может успешно применяться в практике подземного скважинного выщелачивания урана как альтернатива использования пероксида водорода. В качестве биологических окислителей ионов закисного железа могут быть использованы штаммы психротолерантных микроорганизмов, таких как *Acidithiobacillus ferrivorans* SU-4, UZ-1, UZ-2 и UZ-3, обладающих высокой окислительной активностью при температуре 10 °С. Вместе с этим биотехнология открывает возможность извлечения, помимо урана, из технологических растворов целого ряда редких и редкоземельных металлов. На основе микроорганизмов *Rhizopus* sp. FZ-1, *Monoraphidium* sp. CZ и *Pseudomonas putida* KS28 был составлен консорциум с соотношением FZ-1 : CZ : KS28, равным 1:3:2, способный сорбировать и аккумулировать 196, 95 и 71 мг/г селена, германия и скандия, соответственно.

Таким образом, дальнейшее совершенствование биотехнологии в гидрометаллургии позволит существенно повысить рентабельность действующих месторождений и снизить экологическую нагрузку на регионы с интенсивным горнорудным производством.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Асроров А. Азиатский урановый проект [Электрон. ресурс]. - 2006. - URL: <http://www.apn.kz/publications/article7145.htm> (дата обращения: 15.09.2017).
- 2 Разработка технологии подземного бактериального-химического скважинного выщелачивания урана с попутным, комплексным извлечением редких и редкоземельных металлов из урановых месторождений Северного Казахстана: Отчёт о НИР / ТОО «Научно-аналитический центр «Биомедпрепарат»: рук. Балпанов Д.С.; исполн. Ханнанов Р.А. – Степногорск, 2016. – 70 с. – № ГР0115РК02991– Инв.№ 0217РК02333.
- 3 Мамилев В.А. Добыча урана методом подземного выщелачивания. – М: Атомиздат, 1980. – С. 248.
- 4 Найманбаев М.А. Производство редкоземельных элементов в Казахстане // Промышленность Казахстана. – 2008. – № 5.– С. 12-16.
- 5 Philip L., Iyengar L., Venkobachar C. Biosorption of U, La, Pr, Nd, Eu, and Dy by *Pseudomonas aeruginosa* // J. Ind. Microbiol. Biotechnol. – 2000. – № 25. – С. 1-7.

- 6 Andrès Y., MacCordick H.J., Hubert J.C. Adsorption of several actinide (Th, U) and lanthanide (La, Eu, Yb) ions by *Mycobacterium smegmatis* // Appl. Microbiol. Biotechnol. – 1993. - № 39. – С. 413-417.

- 7 Vijayaraghavan. K. Yeoung-Sang Yun. Bacterial biosorbents and biosorption // Biotechnology Advances. – 2008. – N 26. – P. 266–291.

- 8 Каравайко Г.И., Росси Дж., Арате А., Груднев С., Авакян З.А. Биоготехнология металлов // Практическое руководство. – М: Внешторгиздат, 1989. – С. 51-54.

- 9 Нетрусова А.И. Практикум по микробиологии. – М: Академия, 2005. – С. 608.

- 10 Johnston A., Booth C. Plant pathologist's pocketbook. – London: Common Wealth Mycological Institute, 1983. – P. 520.

- 11 Vogel A.I. Vodel's textbook of quantitative chemical. – London: A.I. Vogel, 1989. – P. 690.

- 12 Хафезов И., Цалев Д. Атомно-адсорбционный анализ: Пер. с болгар./под ред. С.З. Яковлевой. – Л: Химия, 1983 – С. 144.

REFERENCES

- 1 Asrorov A. *Aziatskij uranovyyj projekt* (Asian uranium project) [Electron. resource] **2006**. URL: <http://www.apn.kz/publications/article7145.htm> (Date of access 15.09.2017). (in Russ.).
- 2 *Razrabotka tekhnologii podzemnogo bakterial'nogo-khimicheskogo skvazhinogo vyshchelachivaniya urana s poputnym, kompleksnym izvlecheniem redkikh i redkozemel'nykh metallov iz uranovykh mestorozhdenij Severnogo Kazakhstana: Otchet o NIR* (Development of technology for underground bacterial-chemical well leaching of uranium with consentient, integrated recovery of rare and rare-earth metals from uranium deposits of North Kazakhstan: RSW Report) / ТОО «*Nauchno-analiticheskij tsentr «Biomedpreparat»*»: (Scientific-analytical Center - Biomedpreparat LTD) leadership Balpanov D.S.; executor Hannanov R.A. Stepnogorsk, **2016**. 70. State Registration N 0115RK02991. Inventory N 0217RK02333. (in Russ.)
- 3 Mamilov V.A. *Dобыча урана методом подземного выщелачивания* (The extraction of uranium by the method of underground leaching). Moscow: Atomizdat. **1980**, 248. (in Russ.).
- 4 Naimanbaev M.A. *Proizvodstvo redkozemel'nykh ehlementov v Kazakhstane* (Production of rare earth elements in Kazakhstan) *Promyshlennost' Kazakhstana=Industry of Kazakhstan*. **2008**. 2, 12-16 (in Russ.).
- 5 Philip L., Iyengar L. and Venkobachar C. Biosorption of U, La, Pr, Nd, Eu, and Dy by *Pseudomonas aeruginosa*. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* **2000**. 25. 1-7. (in Eng.).
- 6 Andrès Y., MacCordick H.J., Hubert J.C. Adsorption of several actinide (Th, U) and lanthanide (La, Eu, Yb) ions by *Mycobacterium smegmatis*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **1993**. 39, 413-417. (in Eng.).
- 7 Vijayaraghavan K., Yeoung-Sang Yun. Bacterial biosorbents and biosorption. *Biotechnology Advances*. **2008**. 26, 266–291. (in Eng.).

- 8 Karavajko G.I., Rossi Dzh., Agate A., Grudnev S., Avakyan Z.A. *Biogeotekhnologiya metallov* (Biotechnology of metals). *Prakticheskoe rukovodstvo* (Practical guide). Moscow: Vneshtorgizdat, **1989**. 51-54. (in Russ.)
- 9 Netrusova A.I. *Praktikum po mikrobiologii*. (Workshop on microbiology). Moscow: Akademiya. **2005**, 608. (in Russ.)
- 10 Johnston A., Booth C. Plant pathologist's pocketbook. London: Common Wealth Mycological Institute. **1983**, 520. (in Eng.)
- 11 Vogel A.I. Vodel's textbook of quantitative chemical. London: A.I. Vogel, **1989**. 690. (in Eng.)
- 12 Hafezov I., Calev D. *Atomno-adsorbtsionnyj analiz* (Atomic-adsorption analysis). *Per. s bolg.pod red.* (translation from Bulgarian under editorship of S.Z. Yakovleva). Leningrad: Khimiya. **1983**, 144. (in Russ.)

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақала гидрOMETALLURгияның, сондай-ақ биотехнологиялық әдістерді уранды жерасты ұңғыма арқылы шаймалау тәжірибесіне енгізудің өзекті мәселелеріне арналған. Жұмыста қабатқа айдалатын технологиялық ерітіндінің тотығу-тотықсыздану әлеуетін арттыратын шала тотыққан темірді (Fe²⁺) тотыққанға (Fe³⁺) иондарды тотықтандыруға қабілетті *Acidithiobacillus ferrivorans* SU-4, UZ-1, UZ-2, UZ-3 хемолитотрофты микроағзалардың психротолерантты штамдары сипатталған. Осы микроағзалар экономикалық және экологиялық жақтан қазіргі кезде қолданылатын тотықтырғыштарға жақсы балама болар еді. Биотехнологиялық тәсілді қолданудың тағы бір маңызды жақсы қыры – уран кендерінде өнеркәсіптік өндіруді жасайтын мөлшерде сирек және сиреккерлік металдардың ассоциациясы бар. Модельді объект ретінде құрамында селен, германий және скандий бар Семізбай U (Ақмола облысы) кен орнының технологиялық ерітінділері зерттелінді. Жұмыста СМ және СЖМ биоаккумуляциялауы мен биосорбциялауына қабілетті түрлі микроағзалар зерттелінді, оның үшеуі потенциалды биосорбенттер ретінде іріктелді, сондай-ақ олардан консорциум құрылды. *Rhizopus* sp. FZ-1, *Monoraphidium* sp. CZ және *Pseudomonas putida* KS28 микроағзалар негізінде FZ-1 : CZ : KS28 ара қатынаспен 1:3:2 тең 196, 95 және 71 мг/г селенді сұрыптауға және жинақтауға қабілетті консорциум құрылды. Осылайша, биотехнологияны гидрOMETALLURгияға одан әрі жетілдіру қазіргі кен орындарының табыстылығын едәуір арттыруға және қарқынды тау-кен өндірісті аймақтарға экологиялық жүктемені төмендетуге мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: жер асты ұңғымалы уран шаймалау, биотехнология, биосорбция, сирек кездесетін және сирек-жер металдар.

ABSTRACT

The article covers current issues of hydrometallurgy, particularly, biotechnological methods implementation into underground-well leaching of uranium. The work describes psychrotolerant strains of chemolithotrophic microorganisms *Acidithiobacillus ferrivorans* SU-4, UZ-1, UZ-2, UZ-3, which are able to oxidize ferrous ions (Fe²⁺) to ferric ions (Fe³⁺) and therefore increasing redox potential of the technological solution pumped into a reservoir. These microorganisms could be a good alternative to currently used oxidant in terms of ecological and economical side. Use of the biotechnological method has also another significantly positive aspect: uranium ore comprise associations of rare and rare-earth metals in the amount allowed for industrial-scale production. As a model object the technological solutions from a deposit Semizbay U (Akmola region) containing selenium, germanium and scandium were studied. The research focused on different microorganisms those are capable of biosorption and bioaccumulation of rare and rare-earth metals, particularly three of them were selected as potential biosorption agents and were used to create a consortium. The consortium was formed by using *Rhizopus* sp. FZ-1, *Monoraphidium* sp. CZ and *Pseudomonas putida* KS28 with the ratio of 1:3:2, respectively. This consortium was able to accumulate 196 mg/g of selenium, 95 mg/g of germanium and 71 mg/g of scandium. Thus, further implementation of biotechnology into hydrometallurgy will significantly help to improve profitability of current deposits as well as to decrease impact to environment of regions with intensive mining industries.

Key words: underground-well uranium leaching, biotechnology, biosorption, rare and rare-earth metals

Поступила 11.10.2017

УДК 549.615.22 + 66.011

Комплексное использование
минерального сырья. № 4. 2017.

Г. Ф. КРИСЕНКО*, Д. Г. ЭПОВ, Е. Б. МЕРКУЛОВ, М. А. МЕДКОВ

Институт химии Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток, Россия,

*e-mail: Krisenko@ich.dvo.ru

КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДАТОЛИТОВОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ГИДРОДИФТОРИДОМ АММОНИЯ

Резюме: В статье представлены результаты исследований возможности комплексной переработки датолитового минерального сырья гидрофторидом аммония. Вскрытие датолитового минерального сырья гидрофторидом аммония проводили при температуре 150 °С и массовом соотношении датолитовой руды к фторирующему реагенту 1:2,3 в никелевом контейнере, который помещали в реактор с электрообогревом. Используются методы термогравиметрического, рентгенофазового, рентгено-флюо-