

И. А. Блайда, Т. В. Васильева

Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова,
ул. Дворянская, 2, Одесса, 65082, Украина, тел.: +38(048) 746 61 02,
e-mail: iblayda@ukr.inet

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ НЕКОНДИЦИОННЫХ РУД И ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

В статье проанализирована и обобщена информация о применении биотехнологических методов для переработки минерального и техногенного сырья. Приведен обзор основных групп микроорганизмов, входящих в состав микробиоценозов различных экологических ниш и отходов. Показана лидирующая роль кислотофильных хемолитотрофных бактерий в окислении природного сульфидного сырья. Рассмотрены основные механизмы бактериального выщелачивания металлов и влияние различных факторов на эффективность окисления сульфидов металлов. Дана характеристика основным методам бактериального выщелачивания – чановому, подземному и кучному; рассмотрены их преимущества и недостатки. Приведены примеры промышленного использования биовыщелачивания для получения меди, никеля, золота, урана. Отмечено практическое отсутствие применения методов бактериального выщелачивания для переработки техногенного сырья, в частности, отходов угольной промышленности и энергетики для извлечения ценных металлов – германия, галлия и др.

Ключевые слова: техногенное сырье, микробиоценоз, кислотофильные хемолитотрофные бактерии, бактериальное выщелачивание, германий.

Введение. Применение биотехнологических методов для переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения с участием микроорганизмов различных физиологических групп является одним из перспективных, интенсивно развивающихся направлений. В настоящее время уже сформировалась новая научная дисциплина – биогеотехнология металлов, в рамках которой развивается отдельное направление – бактериальное выщелачивание – извлечение металлов из различного сырья под воздействием микроорганизмов или их метаболитов. Произошло это благодаря накопленным знаниям геологической микробиологии, в основе развития которой лежит тот факт, что микроорганизмы принимают активное участие в геологических процессах формирования и изменения полезных ископаемых, вплоть до деструкции природных минералов, сопровождающейся извлечением из



них полезных компонентов [2–4]. О жизнедеятельности и биохимической активности микроорганизмов в субстратах техногенного происхождения научных наблюдений сравнительно мало.

Характеристика микроорганизмов. Экология микроорганизмов, описанных к настоящему времени и используемых в процессах бактериального выщелачивания металлов, достаточно широка – они обнаружены как в природных условиях (вблизи серных геотермальных источников, в природных рудах и рудничных водах), так и в техногенных (в хвостохранилищах, илонакопителях, отвальных терриконах предприятий добывающей и перерабатывающей промышленности). Гетерогенные условия различных экологических ниш с перепадами температур и кислотности, специфическим физико-химическим и минералогическим составом, формируют и поддерживают широкое разнообразие аборигенной микробиоты. Обнаруженное биоразнообразие микробного населения в природных и техногенных нишах достаточно широко и представлено аэробными и анаэробными микроорганизмами, среди которых присутствуют хемолитоавтотрофные и гетеротрофные бактерии. На основании анализа и обобщения литературных данных по изучению состава микробиоценозов медных руд различных шахт Китая [34], пиритной руды (Железная Гора, Калифорния, США) [30], медно-никелевой руды месторождения Шануч (Камчатка, Россия) [10], медного концентрата Зангезурского медно-молибденового комбината (Армения) [37], золотосодержащих арсенопиритных и пиритных концентратов (Красноярский край, Россия) [13], хвостохранилищ после переработки урановой руды Ингульской шахты (Украина) [1], кислых дренажных вод с высокими концентрациями металлов [24, 25, 31, 36], ископаемого угля [29, 41], термальных источников [15, 27, 29], отходов биометаллургической переработки золото-мышьякового концентрата [7], а также имеющихся [28] и собственных исследований [18] по определению состава микробиоты породных отвалов Центральной обогатительной фабрики «Червоноградская» Львовско-Волинского угольного бассейна, золы уносов Ладыжинской и золошлака Добротворской ТЭС, составлена таблица, в которой приведены характеристики наиболее распространенных микроорганизмов, представляющих практический интерес (табл.).

Несмотря на различную природу исследуемых субстратов, их физико-химический и минералогический состав, условия формирования и существования, качественный состав их микробиоценозов во многом схож и представлен в основном ацидофильными хемолитотрофными бактериями, как мезофильными, так и умеренно термофильными. Безусловными лидерами в процессах бактериального извлечения металлов являются представители мезофильных хемолитотрофных бактерий рода *Acidithiobacillus*. Они способны использовать энергию окисления восстановленных соединений серы в серную кислоту для ассимиляции углерода, построения клеточного тела и осуществления остальных жизненных функций. Некоторые тионовые бактерии могут использовать для своей жизнедеятельности, кроме окисления серы, окисление других соединений – органических веществ или закисного железа. Умеренно термофильные бактерии, широко распространенные в микробиоценозах природных руд и техногенных субстратов и проявляющие

Таблица

Table

Микроорганизмы, обнаруженные в геогенных и техногенных экологических нишах

Microorganisms detected in geogenic and technogenic ecological niches

Микроорганизм	Источник выделения	Основные характеристики	Температура °С, диапазон/оптимум	pH, диапазон/оптимум	Г+П, мол. %	Источник энергии	Область применения	Ссылка
Ацидофильные хемолитотрофные мезофильные бактерии								
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Природные и техногенные экологические ниши с высоким содержанием серы и железа: сульфидные руды; ископаемые угли; отвалы, хвосты, шлаки и шламы после добычи и переработки первородных руд	Грамотрицательная палочка (0,2–0,4 мкм) с одним полярным жгутиком, аэроб, автотроф	5,0–40,0/28,0–35,0	1,1–4,5/2,5	58,0–59,0	S ⁰ , Fe ²⁺ , соединения серы	Биовыщелачивание (подземное, чановое, кучное) металлов из сульфидных и смешанных руд, концентратов, некондиционного рудного и техногенного сырья (хвостов, шлаков, отвалов)	[1–4, 10, 12, 13, 18, 28, 30, 31, 34, 37]
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>		Грамотрицательная палочка (0,5–1,0 мкм) с одним полярным спиральным жгутиком, аэроб, автотроф	5,0–40,0/28,0–30,0	0,5–5,5/2,0–3,0	52,0–53,1	S ⁰ , соединения серы	То же	
<i>Acidithiobacillus ferrivorans</i>		Грамотрицательная палочка (0,6–1,2 мкм) подвижная, автотроф/миксотроф/факультативный анаэроб	4,0–34,0/28,0–37,0	1,9–3,4/2,5	56,0	S ⁰ , Fe ²⁺ , соединения серы	То же, десульфуризация углей	



Продолжение таблицы

<i>Leptospirillum ferriphilum</i>	Природные и техногенные экологические ниши с высоким содержанием железа, сульфидные руды	Грамотрицательная спорообразующая клетка (0,9–3,5 мкм), один полярный жгутик, автотроф	10,0–45,0/ 30,0–35,0	Не установлен / 1,5–3,0	55,0–58,0	Fe ²⁺	Биовыщелачивание (подземное, чановое, кучное) металлов из сульфидных и смешанных руд, концентратов, некондиционного рудного и техногенного сырья (хвостов, шлаков, отвалов)	[24, 36]
<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>		Грамотрицательная палочка (0,3–0,6 мкм), один жгутик, автотроф	28,0–30,0/ не установлено	1,3–4,0/ 1,5–3,0	51,7	Fe ²⁺		
<i>Ferroplasma acidiphilum</i>	Природные экологические ниши с низкими значениями pH и высоким содержанием Fe ²⁺ , сульфидные минералы	Клетка неправильной формы (0,3–5,0 мкм) клеточная стенка отсутствует, автотроф	15,0–45,0/ 32,0	1,3–2,2/ 1,7	36,5	Fe ²⁺	То же	[25]
Ацидофильные хемолитотрофные умеренно термофильные бактерии								
<i>Acidithiobacillus caldus</i>	Природные и техногенные экологические ниши с высоким содержанием серы и железа Сульфидные руды (медно-кобальтовые, свинцово-цинковые), геотермальные зоны, зоны спонтанного разложения руд, отходы, терриконы	Грамотрицательная, палочка (0,8–1,2 мкм) с одним полярным спиралевидным жгутиком, аэроб, автотроф/миксотроф	32,0–52,0/ 45,0	1,0–3,5/ 2,0–2,3	63,1–63,9	S ⁰ , соединения серы	То же	[41]
<i>Sulfobacillus thermo sulfidooxidans</i>		Грамположительная, короткая палочка (0,8–3,0 мкм), аэроб, автотроф/миксотроф	20,0–60,0/ 45,0–48,8	1,5–5,5/ 2,0	48,0–50,0	S ⁰ , Fe ²⁺ , соединения серы	То же, десульфуризация углей	[7, 29]



Продолжение таблицы

<i>Sulfobacillus acidophilus</i>	Грамположительная, короткая овальная коккоподобная споробразующая палочка (0,6–1,2 мкм), аэроб, автотроф/миксотроф	35,0–55,0/ 45,0–50,0	2,0–4,0/ 2,0	55,0–57,0	S ⁰ , Fe ²⁺ , соединения серы	Биовыщелачивание (подземное, чановое, кучное) металлов из смешанных и сульфидных руд, концентратов, некондиционного рудного и техногенного сырья (хвостов, шлаков, отвалов)	
	Грамположительная, короткая палочка, аэроб, автотроф/миксотроф	17,0–60,0/ 55,0	1,1–3,5/ 2,2–2,5	48,0–48,2	S ⁰ , Fe ²⁺ , соединения серы	То же	
<i>Sulfobacillus sibiricus</i>							
Ацидофильные экстремально термофильные бактерии							
<i>Acidianus brierleyi</i>	Геотермальные зоны, сульфидные минералы	Клетки неправильной кокковидной формы (1,0–1,5 мкм), автотроф, факультативный аэроб - в анаэробных условиях в присутствии органических веществ окисляет серу, галотолерантен	45,0–75,0/ 70,0	1,0–6,0/ 1,5–2,0	31,0	S ⁰ , Fe ²⁺ , соединения серы	Биовыщелачивание при высоких температурах [15]
<i>Metallosphaera sedula</i>	Геотермальные зоны, вулканические поля, сульфидные минералы, в зонах с высокими	Грамположительная, кокковидная клетка (0,8–1,2 мкм), факультативный аэроб, автотроф,	55,0–80,0/ 75,0	1,0–4,5/ 2,0–3,0	46,0	S ⁰	То же, десульфуризация углей [27]



Продолжение таблицы

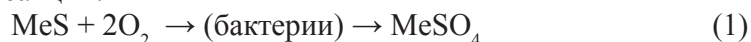
Гетеротрофные микроорганизмы							
концентрации ионов металлов, низкий pH и высокими температурами	микотроф, гетеротроф						
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Природные и техногенные эконизи, сульфидные минералы, каменный уголь, донные отложения, сточные воды, системы очистки сточных вод	Грамотрицательная, спорообразующая прямая или изогнутая палочка (0,5–1,5 мкм) с двумя полярными жгутиками, строгий аэроб	4,0–37,0/ 28,0–30,0	5,5–8,0/ 6,8–7,2	58,0–69,0	Сложные органические вещества белковой и углеводной природы	Восстановление ионов металлов (Fe^{3+} до Fe^{2+}), перевод металлов в летучую форму, осаждение и концентрирование радионуклидов, разрушение органических веществ нефтепродуктов
<i>Bacillus polymyxa</i>	Природные и техногенные эконизи, почвы, растения, ризосфера растений, дренажные воды угольных шахт	Грамположительная, спорообразующая палочка (2,0–5,0 мкм) с перитрихальными жгутиками, аэроб, факультативный анаэроб (способен к нитратредукции)	2,0–45,0/ 25,0–30,0	5,5–9,0/ 6,8–7,2	32,0–62,0	Сложные органические вещества белковой и углеводной природы	Сорбция тяжелых металлов, восстановление марганца, очистка сточных вод, десульфурзация угля
<i>Bacillus mucilaginosus</i>	Природные и техногенные почвы, донные осадки, осадки сточных вод	Грамположительная крупная палочка правильной формы (1,8–5,0 мкм) с мощной слизистой капсулой, аэроб	2,0–45,0/ 28,0–30,0	6,8–7,2/ 7,0	54,5–56,8	Сложные органические вещества белковой и углеводной природы	Разрушение кремнезема и силикатов, биовыщелачивание металлов из силикатных минералов



способность к выщелачиванию металлов, относятся к роду *Sulfobacillus*. Они представляют собой уникальную группу ацидофильных бактерий, встречающуюся в сульфидных и полиметаллических рудах, термальных источниках и зонах спонтанного разогрева руд. Кроме ацидофильных хемолитотрофных в состав микробиоценозов геогенных и техногенных экологических ниш входят типичные гетеротрофные микроорганизмы – представители родов *Pseudomonas* и *Bacillus*, способные восстанавливать и сорбировать металлы, разрушать сложные органические вещества – производные фенола, дибензофурен, органические красители, нефть и нефтепродукты. Некоторые представители гетеротрофных микроорганизмов участвуют в процессах обессеривания углей, разрушении кремнезема и различных силикатов.

Первоначально основное внимание в процессах бактериального выщелачивания уделяли чистым культурам, отдавая предпочтение *Acidithiobacillus ferrooxidans*, коллекционным и выделенным из аборигенных ассоциаций, адаптированным к различным условиям и субстратам [2, 21, 35]. Однако ряд исследований показывает, что смешанные культуры и консорциумы микроорганизмов более эффективны и стабильны в окислении, в частности, сульфидных минералов, чем чистые культуры [16, 38]. Так, в полупромышленных установках бактериального выщелачивания пентландита для ускорения процесса окисления минерала с целью извлечения никеля использовали симбиотическую ассоциацию ацидофильного хемолитотрофа *Acidithiobacillus ferrooxidans* и азотфиксирующего *Beijerinckia lactigones* [38]. Имеются данные о том, что окисление серы в присутствии бактерий *A. thiooxidans*, которые в ассоциациях часто встречаются вместе с *A. ferrooxidans*, протекает гораздо быстрее. Происходит это в силу существующих синтрофных отношений между микроорганизмами, и роль *A. thiooxidans* сводится к созданию благоприятных условий для роста железоокисляющих бактерий, таких как *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Leptospirillum ferrooxidans* [6].

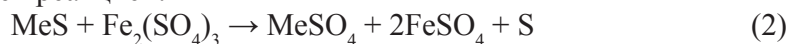
Механизм бактериального выщелачивания. Несмотря на многочисленные исследования и широкое применение бактериального выщелачивания металлов из сульфидных руд, механизм, лежащий в основе этого процесса, и роль, которую играют микроорганизмы при этом, до конца не выяснен. На сегодняшний день предполагают наличие как минимум трех основных механизмов: прямого, непрямого и комбинированного [6, 35, 40]. Прямое бактериальное выщелачивание происходит в несколько стадий при физическом контакте бактериальных клеток с поверхностью минерала при каталитическом воздействии ферментов, и может быть для любого сульфида металла (Me) описано следующей схемой реакции:



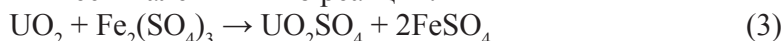
Очевидно, что при этом механизме процесса первостепенное значение играет тесный контакт бактерий с поверхностью минерала, что в свою очередь пропорционально зависит от площади поверхности и наличия дефектов кристаллической решетки. По такому механизму окисляются не содержащие железо сульфидные минералы, такие как ковеллин (CuS), халькозин (Cu_2S), сфалерит (ZnS), галенит (PbS), молибденит (MoS_2), стибнит (Sb_2S_3), кобальтин (CoS), миллерит (NiS) [23].



При непрямом биовыщелачивании микроорганизмам отводится только каталитическая роль при окислении в кислой среде ($\text{pH} < 5,0$) двухвалентного железа до трехвалентного, которое в свою очередь уже служит непосредственным окислителем сульфидов металлов. В этом процессе принимают участие свободные, неприкрепленные к субстрату клетки, и его можно описать следующей реакцией:

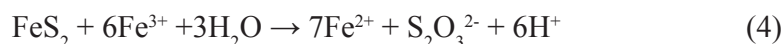


Хорошо известный пример непрямого биовыщелачивания – выделение урана из руд, заключающееся в переходе нерастворимого четырехвалентного урана в растворимый шестивалентный по реакции:

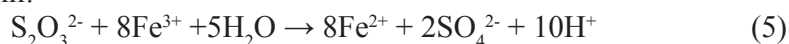


Окислителем U^{4+} выступает Fe^{3+} в виде $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, который образуется в результате жизнедеятельности бактерий *Acidithiobacillus ferrooxidans* при окислении пирита, присутствующего в урановых рудах [6, 35].

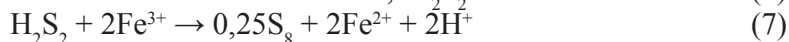
Комбинированный механизм биовыщелачивания был предложен в результате открытия внеклеточных полимерных соединений (ВПС), выделяемых микроорганизмами при прикреплении к поверхности частиц минерала, и был назван авторами «непрямой механизм через тиосульфат» применительно к нерастворимым в кислоте сульфидам и «непрямой полисульфидный механизм» применительно к растворимым в кислоте сульфидам [35]. Согласно данной концепции, как только клетка микроорганизма прикрепляется к поверхности нерастворимого в кислоте сульфида металла (пирита FeS_2 , молибденита MoS_2 , тангстенита WS_2), ион Fe^{3+} , содержащийся во внеклеточном экзополимерном слое, начинает не прямое действие на сульфид металла по реакции:



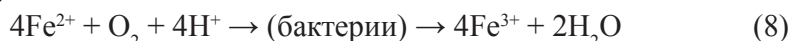
Тиосульфат является первым промежуточным продуктом, который далее через полиитионаты (тетратионат, тритионат) переходит в растворимый сульфат по реакции:



Полисульфидный механизм характерен для таких растворимых в кислотах сульфидов как сфалерит (ZnS), халькопирит (CuFeS_2) или галенит (PbS), растворение которых происходит вследствие комбинированного действия Fe^{3+} и протонов по реакции:



Образующийся Fe^{2+} может быть вновь окислен до Fe^{3+} , благодаря активности *Acidithiobacillus ferrooxidans* и *Sulfobacillus*, присутствующих в природных ассоциациях:



В этом случае роль микроорганизмов сводится к образованию окислителя в виде Fe^{3+} .

Профессор Хельмут Трибуц (Германия) подытожил существование трех основных на сегодняшний день «стратегий» бактериального выщелачивания сульфидных минералов [40]: контактное, когда микроорганизмы прикрепляются к поверхности минерала, способствуя его электрохимическому раство-

рению с помощью Fe^{3+} , содержащегося в ВПС; не прямое, когда микроорганизмы не прикрепляются к поверхности минерала, и их действие ограничено возобновлением окислителя Fe^{3+} ; кооперативное, когда сначала окисление происходит с помощью микроорганизмов, прикрепившихся к поверхности минерала, а затем за счет Fe^{3+} , регенерируемого микроорганизмами в растворе. Однако по какому бы механизму не протекал процесс бактериально-химического выщелачивания, в результате окислительно-восстановительных реакций при непосредственном участии микроорганизмов происходит окисление сульфидов, сопровождающееся извлечением металлов в раствор.

Технологии бактериального выщелачивания и их практическая реализация. Несмотря на то, что начало исследованиям бактериального выщелачивания было положено еще в 1888 году открытием С.Н. Виноградским явления хемолитотрофии, первые работы по направленному использованию метода биовыщелачивания для извлечения металлов начались в 1947 году после выделения Хинкелем и Кольмером из дренажных кислых вод угольной шахты Западная Вирджиния микроорганизмов, способных окислять двухвалентное железо до трехвалентного, отнесенных к *Acidithiobacillus ferrooxidans* [22]. В настоящее время исследованиями процесса бактериального окисления и выщелачивания занимается более 100 научных организаций и фирм в 25 странах мира. Приоритет в развитии биоготехнологии металлов как целой отрасли науки принадлежит Германии, США, Франции, Китаю, Канаде. Построены и действуют десятки промышленных и опытно-промышленных установок бактериального выщелачивания в ЮАР, Австралии, Бразилии, США, Канаде, Замбии, Гане, России и других странах. В основе этих технологий лежит два разных процесса. В одном случае это перевод нерастворимых сульфидов в растворимые сульфаты или создание условий для деструкции минерала, сопровождающееся переходом металла в раствор. Примером второго процесса служит извлечение железа, мышьяка, серы и других балластных компонентов из золотоносных минералов, например, арсенопирита (FeAsS), в результате чего оставшееся в минерале золото концентрируется в нем и далее гораздо легче извлекается традиционным цианированием. Оба этих процесса являются окислительными, но в одном случае ценный металл извлекается из минерала, и это называется «биовыщелачиванием», в другом – металл концентрируется в руде и это называется «биоокислением». В промышленной биотехнологии оба эти процесса относят к биовыщелачиванию, отличительной особенностью которого является возможность извлечения металлов из «бедных» руд, руд сложного состава, руд с тонкой вкрапленностью редких металлов, а также из хвостов и отвалов горно-обогатительных предприятий и других некондиционных источников. Основное внимание уделяется сульфидным и комплексным (медным, медно-никелевым, урановым, золотосодержащим и др.) минералам и промпродуктам их переработки, как наиболее изученным и востребованным. Так, в США более 15% меди и значительное количество урана добывается методами бактериального выщелачивания. При этом биовыщелачивание меди из природных забалансовых руд с содержанием 0,1–0,3% металла обходится в 2–5 раз дешевле, чем традиционная пирометаллургическая обработка.



Основные технологические приемы проведения бактериального выщелачивания сводятся к организации чанового (периодического или непрерывного), кучного или подземного процессов. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Чановое биовыщелачивание (перколяционное или пачуковое в зависимости от организации контакта твердой и жидкой фаз), в отличие от кучного и подземного, это наиболее контролируемый процесс, который обеспечивает высокую степень и скорость извлечения металлов (рис. 1). Возможность осуществления постоянного контроля основных параметров процесса дают возможность поддерживать количество бактерий на постоянном физиологически активном уровне, контролировать селекцию и доминирование наиболее адаптированных и продуктивных бактерий [5, 8].



Рис. 1. Чановая установка биоокисления для предобработки золотоносных минералов рудника Fairview (Южная Африка)

Fig. 1. Leaching plant for preprocessing of gold minerals from Fairview Mine (South Africa)

Технология чанового выщелачивания с использованием ацидофильных хемолитотрофных бактерий в опытном масштабе успешно применена к отходам руды уранового месторождения Форстау, Австрия (содержат $0,03 \div 0,15\%$ урана) [20]; низкосортной урановой руде шахты Турамдих, Индия ($0,03\%$ по U_3O_8) [33]; обедненной урановой руде шахты Сагханд, Иран [14]; руде Ингульской шахты, Украина ($10^{-3} \div 10^{-1}\%$ урана) [1]. В промышленном масштабе наиболее широко чановое биоокисление используют для удаления железа и мышьяка из золотоносных руд, главным образом из-за минимального (контролируемого) экологического воздействия на окружающую среду и ряда других преимуществ. В настоящее время в Китае, Австралии, Уганде и США функционируют около десяти промышленных установок непрерывного чанового биоокисления, работающих по так называемой технологии ВАСОХ, разработанной канадской фирмой ВасТех. В ЮАР, Бразилии, Австралии, Филиппинах, Гане, Перу, Казахстане, Китае и Узбекистане работает около 15 чановых установок по технологии ВІОХ компании Gencor, направленных на

предварительную переработку упорных руд и концентратов перед традиционным извлечением золота путем выщелачивания цианированием. С помощью этих технологий удалось повысить извлечение золота из огнеупорной руды с 40 до 90% [32].

Процессы кучного и подземного выщелачивания, в том числе и бактериального, приобретают особое значение при добыче металлов из руд непосредственно в местах залегания (на глубине в отработанных шахтах), из забалансовых руд и бедных месторождений. Эти технологические приемы требуют длительного времени – от 1 до 3 лет, поскольку осуществляются в природных неконтролируемых условиях, в широком диапазоне температур, редокс потенциала и pH, при различной интенсивности ирригации (орошения), аэрации и доступности питательных веществ (рис. 2). Кучное бактериальное выщелачивание в коммерческих целях впервые было реализовано в 1958 году на медном руднике Bingham Canyon (штат Юта, США) для извлечения меди из некондиционных руд. В настоящее время кучное биовыщелачивание широко применяется для извлечения меди из вторичных медных руд, содержащих минералы халькопирит (Cu_2S) и ковеллин (CuS). Впоследствии, начиная с 1980-х годов, многочисленные установки кучного биовыщелачивания меди были введены в эксплуатацию во многих странах мира, и в конце прошлого века мировое производство меди методом биовыщелачивания достигло 25%. Вслед за медью этот процесс был запущен на урановом руднике Elliot Lake Mine (Онтарио, Канада) для получения урана. В последние годы значительно возросло внимание к кучному бактериальному выщелачиванию с точки зрения подготовки упорного золотосодержащего сырья к цианированию. В результате биоокисления извлечение золота увеличивается до 50,0% по сравнению с 25,7% при прямом цианировании. Проводится много исследований и укрупненных испытаний, однако до практической промышленной реализации дело еще не дошло.



Рис. 2. Кучное бактериальное выщелачивание меди из некондиционных руд медного рудника Bingham Canyon (штат Юта, США)

Fig. 2. Heap leaching copper from substandard ores of copper mine Bingham Canyon (Utah, United States)

В Казахстане, Узбекистане, Армении и России активно развиваются технологии бактериального выщелачивания, в основном урана, золота, меди и никеля, в силу наличия мощной сырьевой базы этих металлов и развитой структуры горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, работающих по традиционным химическим технологиям. Казахстанскими учеными АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения» разработана технология биохимического извлечения золота из упорных руд месторождений Акбакай, Васильковское и Бестобе, обеспечивающая повышение извлечения ценного металла на 15,0–20,0% по сравнению с классической цианидной переработкой. Еще одна разработанная биотехнология обогащения лежалых хвостов Прибалхашской и Акбакайской обогатительных фабрик позволяет получать кондиционные золотосодержащие концентраты с содержанием благородного металла 25,0–30,0 г/т при его извлечении до 70,0%, которые могут далее идти на переработку цианированием [11]. Другая казахстанская компания «BioGeoТес» провела испытания по бактериальному окислению арсенопиритного концентрата на месторождении Бестобе, в результате чего произошло снижение содержания мышьяка в концентрате с 11,0 до 1,1%, а выход золота при последующем цианировании составил 95,0% [42]. Все перечисленные работы проводятся в укрупненном масштабе, подтверждают высокую эффективность и перспективность биотехнологического подхода и находятся на стадии дальнейшего промышленного внедрения.

В Украине есть все необходимые предпосылки для развития и внедрения бактериального выщелачивания, как минимум, урана и золота, по наиболее отработанным и распространенным на сегодняшний день в мировой практике технологиям, описанным выше. Это связано с наличием мощной сырьевой базы урана (по ресурсам и запасам урана Украина входит в первую десятку стран мира и занимает ведущее место в Европе), а также высокому золоторудному потенциалу, который не оценивался должным образом и не представлял государственного интереса, пока Украина входила в состав СССР. Тем не менее, несмотря на перспективность биотехнологических методов, имеются отдельные отрывочные сведения о разработках украинских ученых в этом направлении. Так, в КОУкрГГРИ (Крымское отделение Украинского государственного геологоразведочного института, Симферополь) в 2005–2010 гг. была разработана комплексная биотехнология переработки различных типов золотосодержащих руд, продуктов их обогащения и отходов. Несмотря на широкий диапазон содержания золота в исследуемом сырье (1,3–420 г/т), биореагент извлекал его в раствор на 68–96%. При биоокислении и последующем выщелачивании из высокомышьяковистого сульфидного концентрата (27% As) степень извлечения золота достигала 93,2% против 54,0% при прямом цианировании. Были проведены лабораторные, пилотные и укрупненные испытания разработанной технологии на золотосодержащих рудах месторождений Украины, Китая, России и Греции [9]. На сегодняшний день судьба разработки неизвестна.

Заключение. Несмотря на то, что процессы добычи и переработки гео-генного и техногенного сырья с участием микроорганизмов уже заняли прочную позицию в мировой практике, они способны конкурировать на сегодня с



традиционными технологиями только в отраслях цветной металлургии, связанных с добычей и переработкой сульфидного (медного, уранового, цинкового, никелевого, золотосодержащего) сырья. В литературе отсутствуют данные о разработках биотехнологических подходов к переработке перспективного техногенного сырья, в частности, для извлечения редких металлов – отходов добычи, обогащения и сжигания ископаемых углей. Что касается сведений о возможности целенаправленного или попутного получения редких металлов бактериальным выщелачиванием, то они весьма ограничены и сводятся к известной работе профессора Agrad E. Torma [39], в которой он приводит данные о выщелачивании с помощью *Thiobacillus ferrooxidans* германия и галлия из побочных продуктов переработки алюминия, цинка и меди, в частности, сульфидных минералов - сфалерита и халькопирита, причем с весьма низкими показателями по извлечению редких металлов (до 20%).

В Биотехнологическом научно-учебном центре Одесского национального университета имени И. И. Мечникова на протяжении ряда лет проводятся научно-исследовательские работы по разработке и апробации бактериального выщелачивания редких металлов – германия, галлия, циркония и др. – из промышленных отходов, в частности, обогащения и сжигания углей [17–19]. Установлено наличие в микробиоценозе отходов обогащения и переработки угля представителей гетеротрофных и ацидофильных хемолитотрофных бактерий, в частности мезофильных и умеренно термофильных АХБ родов *Acidithiobacillus* и *Sulfobacillus*, нейтрофильных тионовых и сульфатредуцирующих бактерий. В гетеротрофной составляющей обнаружено присутствие "силикатных" бактерий, способных разрушать кремнезем и устойчивые силикатные структуры. Выделенные чистые культуры микроорганизмов, идентифицированные как *Acidithiobacillus ferrooxidans*, проявили хорошие технологические и биологические свойства (активность, скорость роста, резистентность, способность к адаптации и др.) и послужили основой унифицированного бактериального препарата для биовыщелачивания германия из бедных субстратов, в частности, техногенного происхождения. Извлечение германия в процессе чанового биовыщелачивания при установленных оптимальных условиях и использовании питательной среды рассчитанного оптимального состава превышает 90%. Разработанная биотехнология переработки породных отвалов обогащения каменного угля с получением германиевого концентрата защищена Патентами Украины и показала свою высокую эффективность при укрупненных испытаниях в условиях действующего предприятия ТЭК Украины.



І. А. Блайда, Т. В. Васильєва

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
вул. Дворянська, 2, Одеса, 65082, Україна, тел.: +38(048) 746 61 02,
e-mail: iblayda@ukr.net

БІОТЕХНОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ПЕРЕРОБКИ НЕКОНДИЦІЙНИХ РУД І ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ

Реферат

У статті проаналізована та узагальнена інформація про застосування біотехнологічних методів для переробки мінеральної і техногенної сировини. Наведено огляд основних груп мікроорганізмів, що входять до складу мікробіоценозів різних екологічних ніш і відходів. Показана провідна роль ацидофільних хемолітотрофних бактерій в окисненні природної сульфідної сировини. Розглянуто основні механізми бактеріального вилугування металів і вплив різних чинників на ефективність окиснення сульфідів металів. Описано характеристику основних методів бактеріального вилугування – чанового, підземного і купчастого; розглянуто їх переваги та недоліки. Наведені приклади промислового використання біовилугування для отримання міді, нікелю, золота, урану. Відзначена практично відсутність застосування методів бактеріального вилугування для переробки техногенної сировини, зокрема, відходів вугільної промисловості та енергетики для вилучення цінних металів – германію, галію та ін.

Ключові слова: техногенна сировина, мікробіоценоз, ацидофільні хемолітотрофні бактерії, бактеріальне вилугування, германій.

I. A. Blayda, T. V. Vasyleva

Odesa National Mechnykov University, 2, Dvoryanska St.,
Odesa, 65082, Ukraine, tel.: +38 (048) 746 51 02,
e-mail: iblayda@ukr.net

BIOTECHNOLOGICAL METHODS FOR PROCESSING SUBSTANDARD ORES AND WASTES

Summary

The information about using of biotechnological methods for the processing of mineral and technogenic raw materials was analyzed and summarized in the article. A review of the main groups of microorganisms that make up the microbiocenosis of various ecological niches and wastes is given. The leading role of acidophilic chemolithotrophic bacteria in the oxidation process of natural sulphide raw materials is also shown. Basic mechanisms of bacterial leaching of metals and the influence of various factors on the efficiency of oxidation of sulfides are considered. A characteristic of the main methods of bacterial leaching – tanks, underground and heap was given and there were considered their advantages and disadvantages. The article gives the world examples of the use of bioleaching for the production of copper, nickel, gold, uranium. It is noted that there is no practical application of bacterial leaching for processing technogenic raw materials, in



particular; coal and energy industry waste for the extraction of valuable metals – germanium, gallium, etc.

Key words: technogenic raw materials, microbiocenosis, acidophilic chemolithotrophic bacteria, bacterial leaching, germanium

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дербасова Н. М., Гавриш М. В., Смирнов С. Б. Бактериальное выщелачивание урана из отходов уранодобывающей промышленности // Ядерна та радіаційна безпека. – 2011. – 2, № 50. – С. 52–55.
2. Заварзин Г. А. Литотрофные микроорганизмы. – М.: Наука, 1972. – 254 с.
3. Иванов М. В., Каравайко Г. И. Геологическая микробиология // Микробиология. – 2004. – 73, № 5. – С. 581–597.
4. Каравайко Г. И., Кузнецов С. И., Голомзик А. И. Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руд. – М.: Наука, 1972. – 248 с.
5. Каравайко Г. И., Росси Дж., Агате А. и др. Биотехнология металлов. Практическое руководство. – М.: Центр международных проектов ГКНТ, 1989. – 375 с.
6. Кузякина Т. И., Хайнасова Т. С., Левенец О. О. Биотехнология извлечения металлов из сульфидных руд // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2008. – 2, № 12. – С. 76–86.
7. Меламуд В. С., Пивоварова Т. А., Турова Т. П. *Sulfobacillus sibiricus* sp. nov. новая умеренно термофильная бактерия // Микробиология. – 2003. – 72, № 5. – С. 681–688.
8. Полькин С. И., Адамов Э. В., Панин В. В. Биоготехнология металлов. – М.: Недра, 1985. – 243 с.
9. Сидякина Г. Г., Носальская Т. В., Смирнова О. М. Экологически чистая биотехнология обогащения золотосодержащих руд техногенных отходов. // Мат. Крым. отд. Укр. госуд.Геологоразведоч. ин-та, Украина, Симферополь, 2010. – С. 18–42.
10. Трухин Ю. П., Хайнасова Т. С., Рогатых С. В. Выделение хемолитотрофных микроорганизмов из окисленной руды медно-никелевого месторождения Шануч (Камчатка) для биовыщелачивания сульфидных руд // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2012. – 1, № 2. – С. 83–92.
11. Черняк А. С., Сафронов А. Ю., Кашевский А. В. Биотехнология и бионеорганическая химия благородных металлов: состояние и перспективы // Матер. науч.-практ. конф. «Химия и хим. технология на рубеже тысячелетий» (Томск, март 2000): Томск: Изд-во ТПУ, 2000. – Т. 1. – С. 169–172.
12. Черняк А. С. Основы биотехнологии металлов. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2002. – 102 с.
13. Шкетова А. Н., Селезнев А. Н. Применение биоготехнологии при извлечении золота из сульфидных углистых руд // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2014. – 1, № 6. – С. 34–42.
14. Abdollahy Mahmoud, Shojaosadati Sayed Abbas, Zare Tavakoli Hasan, Valivand Ali. Bioleaching of Low Grade Uranium Ore of Saghand Mine // Research Note. – 2011. – 30, № 4. – P. 71–79.



15. *Andreas Segerer, Annemarie Neuner, Jakob K. Kristjansson, Karl O. Stetter. Acidianus infernus* gen. nov., sp. nov. and *Acidianus brierleyi* comb. nov.: Facultatively Aerobic, Extremely Acidophilic Thermophilic Sulfur-Metabolizing Archaeobacteria // International Union of Microbiological Societies. – 1986. – 36, № 4. – P. 559–564.
16. *Baker B. J., Banfield J. F.* Microbial communities in acid mine drainage // FEMS Microbiol. Ecol. – 2003. – 44. – P. 139–152.
17. *Blayda I., Vasyleva T., Slysarenko L., Abisheva Z., Ivanytsia V.* The germanium extraction from industrial wastes by microbiological methods // XXVI International Mineral Processing Congress (IMPC 2012). – New Delhi, India – 2012. – P. 550–558.
18. *Blayda I., Vasyleva T., Baranov V., Slysarenko L., Shulyakova S., Brodiazhenko T.* Composition of Aboriginal Consortium of Microorganisms from Coal Mines Dumps // Біологічні Студії / Studia Biologica. – 2017 – 11, № 2. – С. 67–78.
19. *Blayda I. A., Vasyliieva N. Yu., Vasyliieva T. V., Sliusarenko L. I.* Variance Analysis for Optimization of the Germanium Bioleaching Process from Coal Beneficiation Dumps // Biotechnologia Acta. – 2017. – 10, № 4. – P. 44–52.
20. *Bosecker K., Wirth G.* Bacterial Leaching of a Carbonate Bearing Uranium Ore // Biogeochemistry of Ancient and Modern Environments. – 1979. – P. 577–582.
21. *Bosecker K.* Bioleaching: metal solubilization by microorganisms // FEMS Microbiol. Rev. – 1997. – 20. – P. 591–604.
22. *Colmer A. R., Hinkle M. E.* The role of microorganisms in acid mine drainage: A preliminary report // Science. – 1947. – 106. – P. 253–256.
23. *El-Midany A., Abdel-Khalek M.A.* Reducing sulfur and ash from coal using *Bacillus subtilis* and *Paenibacillus polymyxa* // Fuel. – 2014. – 115. – P. 589–595.
24. *Giaveno A., Lavallo L., Chiacchiarini P., Donati E.* Bioleaching of zinc from low-grade complex sulfide ores in an airlift by isolated *Leptospirillum ferrooxidans* // Hydrometallurgy. – 2007. – 89. – P. 117–126.
25. *Golyshina O., Timmis K.* Ferroplasma and relatives, recently discovered cell wall lacking archaea making a living in extremely acid, heavy metal rich environments // Environ. Microbiol. – 2005. – 7, № 9. – P. 1277–1288.
26. *Karavaiko G. I., Lobyreva L. B.* An overview of the bacteria and archaea involved in removal of inorganic and organic sulfur compounds from coal // Fuel Process Technol. – 1994. – 40. – P. 167–182.
27. *Kathryne S. Auernik, Robert M. Kelly.* Physiological Versatility of the Extremely Thermoacidophilic Archaeon *Metallosphaera sedula* Supported by Transcriptomic Analysis of Heterotrophic, Autotrophic, and Mixotrophic Growth // Applied and Environmental Microbiology. – 2010. – 76, № 3. – P. 931–935.
28. *Kuzmishyna S., Hnatysh S., Moroz O., Karpinets L., Baranov V.* Microbiota of Chervonograd Mining Region // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. біол. – 2014. – № 67. – С. 234–242.
29. *Norris P. R., Clark D. A., Owen J. P., Waterhouse S.* Characteristics of *Sulfobacillus acidophilus*, sp. nov., and other moderately thermophilic mineral-



sulphide-oxidizing bacteria // Microbiology (UK). – 1996. – 142, № 4. – P. 775–783.

30. Philip L. Bond, Greg K. Druschel, Jillian F. Banfield. Comparison of Acid Mine Drainage Microbial Communities in Physically and Distinct Ecosystems // Appl. Environ Microbiol. – 2000. – 66, № 11. – P. 4962–4971.

31. Pinar Aytar, Catherine M. Kay, Mehmet Burcin Mutlu, Ahmet Cabuk. Coal Desulfurization with Acidithiobacillus ferrivorans from Balya Acidic Mine Drainage // Energy Fuels. – 2013. – 27, № 6. – P. 3090–3098.

32. Olson G. J., Brierley J. A., Brierley C. L. Bioleaching review part B: Progress in bioleaching: applications of microbial processes by the minerals industries // Appl. Microbiol. Biotechnol. – 2003. – 63. – P. 249–257.

33. Pal S., Pradhan D., Das T., Sukla L. B., Roy G. Chaudhury. Bioleaching of low-grade uranium ore using *Acidithiobacillus ferrooxidans* // Indian J. Microbiol. – 2010. – 50, № 1. – P. 70–75.

34. Qiu Guan-zhou, Liu Xue-duan, Zhou Hong-bo. Microbial community structure and function in sulfide ore bioleaching systems // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2008. – № 18. – P. 1295–1301.

35. Sand W., Gehrke T., Jozsa P.-G., Schippers A. (Bio) chemistry of bacterial leaching – direct vs indirect bioleaching // Hydrometallurgy. – 2001. – 59. – P. 159–175.

36. Shuang Mi, Jian Song, Jianqun Lin, Yuanyuan Che, Huajun Zheng, Jianqiang Lin. Complete Genome of *Leptospirillum ferriphilum* ML-04 Provides Insight into Its Physiology and Environmental Adaptation // The Microbiological Society of Korea. – 2011 – 49, № 6. – P. 890–901.

37. Stepanyan S. Kh., Vardanyan A. K., Vardanyan N. S. Biooxidation of pyrite, sulfide ore and copper concentrate by new isolated sulfur and/or iron oxidizing bacteria // Biolog. Journal of Armenia. – 2016. – 68, № 1. – P. 6–10.

38. Torma A. E. The role of *Thiobacillus ferrooxidans* in hydrometallurgical processes // Advances in Biochemical Engineering. – 1977. – 6. – P. 1–37.

39. Torma Arpad E. The Microbiological Extraction of Less Common Metals. Overview // JOM. – 1989. – P. 32–35.

40. Tributsch H. Direct vs indirect bioleaching // Hydrometallurgy. – 2001. – 59. – P. 177–185.

41. Zhou Qiu Guan, Bo Fu, Hong Bo Zhou et al. Isolation of a strain of *Acidithiobacillus caldus* and its role in bioleaching of chalcopyrite // World Journal of Microbiology & Biotechnology. – 2007. – 23, № 9. – P. 1217–1225.

42. Отраслевой портал горно-металлургической промышленности «Metal Mining info» <http://metalmininginfo.kz/archives/3224>

References

1. Derbasova NM, Gavrish MV, Smirnov SB. Bakterialnoe vyischelachivanie urana iz othodov uranodobyivayushey promyshlennosti. Yaderna ta radiatsiyna bezpeka. 2011;2(50):52-55 (in Russian)

2. Zavarzin GA. Litotrofnyie mikroorganizmyi, Nauka, Moskva, 1972:254.

3. Ivanov MV, Karavayko GI. Geologicheskaya mikrobiologiya. Mikrobiologiya. 2004; 73(5):581–597 (in Russian)



4. Karavayko GI, Kuznetsov SI, Golomzik AI. Rol mikroorganizmov v vyischelachivani metallov iz rud. Nauka, Moskva, 1972:248 (in Russian)
5. Karavayko GI, Rossi J., Agate A. Biogetehnologiya metallov. Prakticheskoe rukovodstvo. Tsentr mezhdunarodnykh proektov Gosudarstvennogo komiteta po nauke i tekhnike. Moskva. 1989:375 (in Russian)
6. Kuzyakina TI, Hainasova TS, Levenez OO. Bitehnologiya izvlecheniya metallov iz sulfidnykh rud. Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2008;2(12):76-86 (in Russian)
7. Melamud VS, Pivovarova TA, Turova TP. *Sulfobacillus sibiricus* sp. nov. novaya umerenno termofilnaya bakteriya. Mikrobiologiya.2003;(72(5)):681-688.
8. Polkin SI, Adamov EV, Panin VV. Biogetehnologiya metallov. Nedra. Moskva, 1985:243 (in Russian)
9. Sidiyakina GG, Nosalskaya TV, Smirnova OM. Ekologicheskii chistaya biotehnologiya obogascheniya zolotosoderzhaschikh rud tehnogennykh othodov. In: Materialy Krymskogo otdeleniya Ukrainskogo gosudarstvennogo Geologorazvedochnogo institute. Simferopol.2010:18-42 (in Russian)
10. Trukhin YuP., Haynasova TS, Rogatykh SV. Vydelenie hemolitotrofnikh mikroorganizmov iz okislennoy rudy medno-nikelevogo mestorozhdeniya Shanuch (Kamchatka) dlya biovyischelachivaniya sulfidnykh rud. Izvestiya vuzov. Prikladnaya himiya i biotehnologiya. 2012;1(2):83-92 (in Russian)
11. Chernyak AS, Safronov AY., Kashevsky AV. Biotehnologiya i bioneorganicheskaya himiya blagorodnykh metallov: sostoyanie i prespektivy In: Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Himiya i him. tehnologiya na rubezhe tyisyacheletiy». Tomsk.2000;(1):169-172 (in Russian)
12. Chernyak AS. Osnovy biotehnologii metallov. Izdatelstvo Irkutskogo universiteta. Irkutsk. 2002:102 (in Russian)
13. Shketova LE, Seleznev AN. Primenenie biogetehnologii pri izvlechenii zolota iz sulfidnykh uglistykh rud. Izvestiya vuzov. Prikladnaya himiya i biotehnologiya.2014;1(6):34-42 (in Russian)
14. Abdollahy Mahmoud, Shojaosadati Sayed Abbas, Zare Tavakoli Hasan, Valivand Ali. Bioleaching of Low Grade Uranium Ore of Saghand Mine. Research Note. 2011;30(4):71-79.
15. Andreas Segerer, Annemarie Neuner, Jakob K. Kristjansson, Karl O. Stetter. *Acidianus infernus* gen. nov., sp. nov. and *Acidianus brierleyi* comb. nov.: Facultatively Aerobic, Extremely Acidophilic Thermophilic Sulfur-Metabolizing Archaeobacteria. International Union of Microbiological Societies.1986;36(4):559-564.
16. Baker BJ, Banfield JF. Microbial communities in acid mine drainage. // FEMS Microbiol. Ecol. – 2003. – Vol. 44. – P. 139 – 152.
17. Blayda I, Vasyleva T, Shlyusarenko L, Abisheva Z, Ivanytsia V. The germanium extraction from industrial wastes by microbiological methods. In: XXVI International Mineral Processing Congress (IMPC 2012). New Delhi, India. 2012:550-558.
18. Blayda I, Vasyleva T, Baranov V, Shlyusarenko L, Shulyakova S, Brodiazhenko T. Composition of Aboriginal Consortium of Microorganisms from Coal Mines Dumps. Biologichni Studiyi.2017;11(2):67– 78.



19. Blayda IA., Vasylieva NYu., Vasylieva TV., Sliusarenko LI. Variance Analysis for Optimization of the Germanium Bioleaching Process from Coal Beneficiation Dumps. *Biotechnologia Acta*. 2017;10(4):44-52.
20. Bosecker K, Wirth G. Bacterial Leaching of a Carbonate Bearing Uranium Ore. *Biogeochemistry of Ancient and Modern Environments*. 1979:577-582.
21. Bosecker K. Bioleaching: metal solubilization by microorganisms. *FEMS Microbiol. Rev.* 1997;(20):591-604.
22. Colmer AR, Hinkle ME. The role of microorganisms in acid mine drainage: A preliminary report. *Science*. 1947;(106):253-256.
23. El-Midany A, Abdel-Khalek MA. Reducing sulfur and ash from coal using *Bacillus subtilis* and *Paenibacillus polymyxa*. *Fuel*. 2014;(115):589-595.
24. Giaveno A, Lavallo L, Chiacchiarini P, Donati E. Bioleaching of zinc from low-grade complex sulfide ores in an airlift by isolated *Leptospirillum ferrooxidans*. *Hydrometallurgy*. 2007;(89):117-126.
25. Golyshina O, Timmis K. Ferroplasma and relatives, recently discovered cell wall lacking archaea making a living in extremely acid, heavy metal rich environments. *Environ. Microbiol.* 2005;(7(9)):1277-1288.
26. Karavaiko GI, Lobyreva LB. An overview of the bacteria and archaea involved in removal of inorganic and organic sulfur compounds from coal. *Fuel Process Technol.* 1994;(40):167-182.
27. Kathryne S. Auernik, Robert M. Kelly. Physiological Versatility of the Extremely Thermoacidophilic Archaeon *Metallosphaera sedula* Supported by Transcriptomic Analysis of Heterotrophic, Autotrophic, and Mixotrophic. *Applied and Environmental Microbiology*. 2010;76(3):931-935.
28. Kuzmishyna S, Hnatysh S, Moroz O, Karpinets L, Baranov V. Microbiota of Chervonograd Mining Region. *Visn. Lviv. Un-ty. Ser. Boil.* 2014;67:234-242.
29. Norris PR, Clark DA, Owen JP, Waterhouse S. Characteristics of *Sulfobacillus acidophilus*, sp. nov., and other moderately thermophilic mineral-sulphide-oxidizing bacteria. *Microbiology (UK)*. 1996;(142):775-783.
30. Philip L. Bond, Greg K. Druschel, and Jillian F. Banfield. Comparison of Acid Mine Drainage Microbial Communities in Physically and Distinct Ecosystems. *Appl Environ Microbiol.* 2000; 66(11): 4962-4971.
31. Pinar Aytar, Catherine M. Kay, Mehmet Burcin Mutlu, Ahmet Cabuk. Coal Desulfurization with *Acidithiobacillus ferrooxidans* from Balya Acidic Mine Drainage. *Energy Fuels*. 2013;27 (6):3090-3098.
32. Olson GJ, Brierley JA, Brierley CL. Bioleaching review part B: Progress in bioleaching: applications of microbial processes by the minerals industries. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2003;(63):249-257.
33. Pal S, Pradhan D, Das T, Sukla LB, Roy G. Chaudhury. Bioleaching of low-grade uranium ore using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Indian J. Microbiol.* 2010;50(1):70-75.
34. Qiu Guan-zhou, Liu Xue-duan, Zhou Hong-bo. Microbial community structure and function in sulfide ore bioleaching systems. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2008;(18):1295-1301.
35. Sand W, Gehrke T, Jozsa PG, Schippers A. (Bio) chemistry of bacterial leaching – direct vs indirect bioleaching. *Hydrometallurgy*. 2001;(59):159-175.



36. Shuang Mi, Jian Song, Jianqun Lin, Yuanyuan Che, Huajun Zheng, Jianqiang Lin. Complete Genome of *Leptospirillum ferriphilum* ML-04 Provides Insight into Its Physiology and Environmental Adaptation . The Microbiological Society of Korea. 2011;49(6):890-901.

37. Stepanyan SKh, Vardanyan AK, Vardanyan, NS. Biooxidation of pyrite, sulfide ore and copper concentrate by new isolated sulfur and/or iron oxidizing bacteria. Biolog. Journal of Armenia. 2016;(68(1)):6-10.

38. Torma AE. The role of *Thiobacillus ferrooxidans* in hydrometallurgical processes. Advances in Biochemical Engineering. 1977;(6):1–37.

39. Torma Arpad E. The Microbiological Extraction of Less Common Metals. Overview. JOM. 1989:32-35.

40. Tributsch H. Direct vs indirect bioleaching. Hydrometallurgy. 2001;(59):177-185.

41. Zhou Qiu Guan, Bo Fu, Hong Bo Zhou et al. Isolation of a strain of *Acidithiobacillus caldus* and its role in bioleaching of chalcopyrite. World Journal of Microbiology & Biotechnology. 2007;23(9):1217-1225.

42. Otralevoy portal gorno-metallurgicheskoy promyshlennosti «Metal Mining info» <http://metalmininginfo.kz/archives/3224>

Стаття надійшла до редакції 03.05.2018 р.

