

Т. В. ВАСИЛЬЕВА, И. А. БЛАЙДА*, Н. Ю. ВАСИЛЬЕВА,
В. Ф. ХИТРИЧ, Т. А. БРОДЯЖЕНКО

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова,
Одесса, Украина, *iblayda@ukr.net

РОЛЬ МЕЗОФИЛЬНЫХ И УМЕРЕННО ТЕРМОФИЛЬНЫХ БАКТЕРИЙ В ПРОЦЕССАХ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ГЕРМАНИЙСОДЕРЖАЩИХ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ¹

В статье приведены результаты комплексного изучения культур ацидофильных хемолитотрофных бактерий, изолированных из техногенных отходов предприятий углеобогащения и энергетики. При выполнении работы использованы классические микробиологические и химические методы исследований. У 6 изолированных и отобранных культур изучены основные биологические свойства: особенности автотрофного и миксотрофного роста, отношение к различным источникам энергии, способность выщелачивать металлы из техногенных отходов. Установлено подобие вновь изолированных культур ранее выделенным из природных сульфидных ниш и описанным в литературных источниках. В статье освещается возможный механизм бактериально-химического окисления железа и тиосульфата ацидофильными хемолитотрофными бактериями. Изученные культуры принадлежат к различным филогенетически отдаленным группам: грамотрицательным бактериям рода *Acidithiobacillus* и грамположительным рода *Sulfobacillus*. Для изученных культур бактерий показана высокая эффективность извлечения металлов из породных отвалов ЦОФ Львовско-Волынского угольного бассейна и золы-уноса от сжигания углей на Ладыжинской ТЭС. Мезофильные штаммы *A.sp.* МФLv37 и *A.sp.* МФLad27, изолированные из отходов углеобогащения и энергетики, окисляли серу, ее восстановленные соединения и двухвалентное железо. Два других – *A.sp.* МФLv69 и *A.sp.* МФLad73 не использовали железо в качестве источника энергии. Независимо от используемого источника энергии эти штаммы отличались высокой выщелачивающей активностью: эффективность извлечения редких металлов – германия и галлия – составляла 79,8-86,9 и 70,33-83,0 % соответственно. Сравнительный анализ полученных результатов свидетельствует о том, что независимо от источника выделения наиболее активными оказались умеренно термофильные штаммы *S.sp.* УТФLv35 и *S.sp.* УТФLad29.

Ключевые слова: породные отвалы углеобогащения, зола-унос, бактериальное выщелачивание, мезофильные, умеренно термофильные хемолитотрофные бактерии, германий, галлий, токсичные металлы.

Введение. Одним из развивающихся современных направлений биогидрометаллургии считается бактериально-химическое окисление сульфидов металлов, сопровождающееся извлечением металлов, в том числе редких и благородных. На сегодняшний день бактериальное выщелачивание приходит на смену обычному выщелачиванию, где в качестве реагента, переводящего в раствор твердые вещества, использовали смесь различных кислот и щелочей. В основе бактериального выщелачивания лежит

метаболическая активность микроорганизмов различных таксономических групп. В состав микробных ценозов природного и техногенного минерального сырья входят представители мезофильных ацидофильных хемолитотрофных бактерий, относящиеся к роду *Acidithiobacillus* [1-4]. В последнее время внимание исследователей привлекает группа умеренно термофильных бактерий, так как при повышенной температуре процессы выщелачивания проходят интенсивнее и в более короткие сроки. Типичные

¹Материалы статьи доложены на Международной научной конференции «Ресурсосберегающие технологии в обогащении руд и металлургии цветных металлов», г. Алматы, 14-17 сентября 2015 г.

представители умеренно термофильных ацидофильных бактерий – бактерии рода *Sulfobacillus* [5-7]. Таким образом, перспективным и развивающимся направлением биотехнологии бактериального выщелачивания металлов являются не новые технологические решения, а поиск, селекция и применение новых микроорганизмов, которые ведут процессы выщелачивания при повышенной температуре, при умеренно кислых или нейтральных значениях pH.

Цель исследований – сравнительное изучение основных биологических и практически полезных свойств мезофильных и умеренно термофильных ацидофильных хемолитотрофных бактерий, изолированных из минерального сырья техногенного происхождения.

Экспериментальная часть. Объектом исследований были мезофильные и умеренно термофильные бактерии, изолированные из породных отвалов Центральной обогатительной фабрики (ЦОФ) Львовско-Волинского угольного бассейна и золы от сжигания углей на Ладыжинской ТЭС (Украина).

Изучение морфологии, физиолого-биохимических и практически полезных свойств изолированных культур проводили, руководствуясь различными методическими указаниями. Морфологию клеток и сформированных ими колоний изучали с помощью светового Primo Star PC и электронного ПЕМ100-01 микроскопов. Прирост биомассы определяли на спектрофотометре КФК-2 при длине волны 540 нм и путем подсчета клеток в камере Горяева [8-12]. Химический анализ растворов на содержание металлов проводили с применением метода спектроскопии атомной абсорбции на приборах ААС-1 и С-115ПК *Selmi* [13]. Германий определяли экстракционно-фотометрическим методом на спектрофотометре КФК-2 в виде германомолибденовой кислоты с предыдущим экстракционным выделением примесей четыреххлористым углеродом [14]. Анализ на галлий осуществляли методом визуальной колориметрии с родамином С [15].

Выщелачивающую активность определяли при культивировании изученных культур бактерий в емкостях объемом 0,5 дм³ в стационарных условиях в присутствии исследованных техногенных отходов. Постоянными параметрами процесса извлечения металлов чистыми культурами были – соотношения твердой и жидкой

фаз Т:Ж=1:10, pH ≤ 2,0, температура 30,0±2,0 °С для мезофильных штаммов и 50,0±2,0 °С для умеренно термофильных бактерий; длительность процесса выщелачивания 28 суток [4, 16, 17]. Культивирование бактерий осуществляли на стандартной среде Сильвермана – Лундгрема 9К состава, г/дм³: K₂HPO₄ – 0,5; MgSO₄ – 0,5; (NH₄)₂SO₄ – 3,0; KCl – 0,1; Ca(NO₃)₂ – 0,01; Fe⁺² – 9,0 и на среде 9К*, рекомендованной для сульфобацилл состава, г/дм³: KH₂PO₄ – 0,05; MgSO₄ – 0,5; KCl – 0,05; NaCl – 0,05; Na₂SO₄ – 0,15; Fe⁺² – 6,0; дрожжевой экстракт – 0,02. В отдельной серии экспериментов в качестве энергетического субстрата к среде 9К добавляли тиосульфат в концентрации 2,0 г/дм³ в пересчете на ион S⁺² [1, 9, 18]. В емкости для выщелачивания металлов вносили 10,0 г породных отвалов или золы-уносов и стерилизовали в автоклаве при 120,0±2,0 °С в течение 30 мин. После стерилизации в них заливали 100,0 см³ стерильной среды 9К или 9К* и вносили 2,0 % (об.) бактериальной суспензии, полученной на жидкой среде аналогичного состава. Количество клеток бактерий в культуральной жидкости составляло 10⁶ кл/см³, что соответствовало показателю оптической плотности 0,2-0,25. После окончания эксперимента в выщелачивающих растворах определяли концентрацию редких (германий, галлий) и токсичных (свинец, медь, кадмий, цинк) металлов. О выщелачивающей активности изучаемых культур бактерий, как мезофильных, так и умеренно термофильных, судили по степени (%) извлечения металлов из твердой фазы в раствор.

Обсуждение результатов. В процессе выполнения исследований из породных отвалов ЦОФ Львовско-Волинского угольного бассейна и золы от сжигания энергетических углей на Ладыжинской теплоэлектростанции изолированы 53 чистые культуры ацидофильных хемолитотрофных бактерий. Среди них 37 грамотрицательных мезофильных (в том числе 21 – окисляющая серу, ее соединения и двухвалентное железо и 16 – не окисляющих железо), 14 грамположительных умеренно термофильных и 2 термофильных. Эти культуры хранятся в музее кафедры микробиологии, вирусологии и биотехнологии Одесского национального университета им. И. И. Мечникова, которая является филиалом Национальной коллекции микроорганизмов Украины. Для дальнейших исследований отобраны 6 штаммов, которым присвоены

Таблица 1 – Штаммовые номера изученных культур ацидофильных хемолитотрофных мезофильных и умеренно термофильных бактерий

Источник выделения					
породные отвалы ЦОФ Львовско-Волынского угольного бассейна			зола-унос Ладыжинской ТЭС		
мезофильные штаммы		умеренно термофиль- ные штаммы	мезофильные штаммы		умеренно термофиль- ные штаммы
Штаммовые номера					
МФLv37	МФLv69	УТФLv35	МФLad27	МФLad73	УТФLad29

штаммовые номера, соответствующие источнику выделения (Lv – породные отвалы ЦОФ Львовско-Волынского угольного бассейна; Lad – зола-унос Ладыжинской ТЭС) и отношению к температуре (МФ – мезофильные; УТФ – умеренно термофильные) (таблица 1).

Результаты изучения микроскопических препаратов в световом и электронном микроскопах показали, что независимо от источника выделения (отвалов ЦОФ или золы-уноса ТЭС) клетки мезофильных и умеренно термофильных бактерий представляли собой палочковидные клетки, отличающиеся по форме и размерам (рисунки 1 и 2).

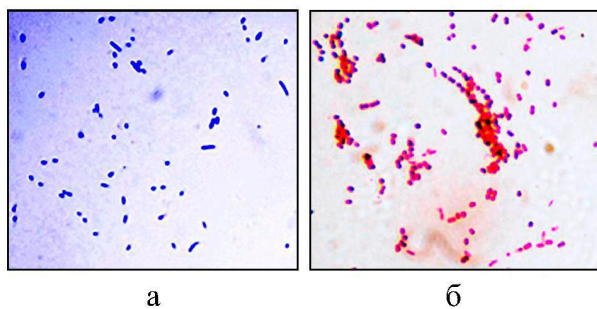


Рисунок 1 – Окрашенный микроскопический препарат клеток бактерий, изолированных из породных отвалов: а – МФLv37; б – УТФLv35; ув.х1000

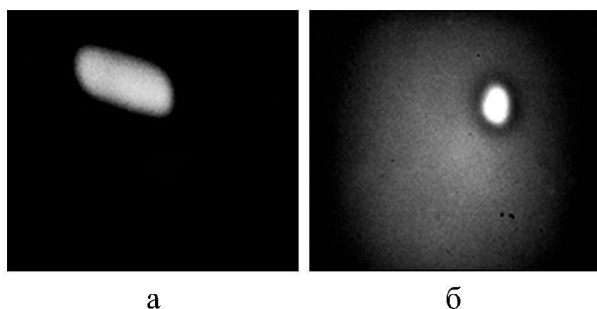


Рисунок 2 – Электронные фотографии клеток бактерий, изолированных из породных отвалов: а – МФLv37, ув.х11000; б – УТФLv35, ув.х15000

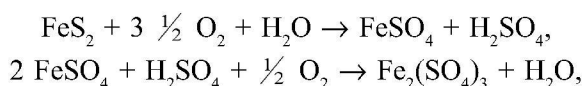
Изолированные бактерии отличались скоростью роста, количеством образованной биомассы, отношением к дополнительным факторам роста, эффективностью окисления источников энергии (неорганических и органических соединений серы, двухвалентного железа и тиосульфата) и выщелачивающей активностью. Основные культурально-морфологические свойства вышеперечисленных культур ацидофильных хемолитотрофных бактерий приведены в таблице 2.

В основе современной классификации ацидофильных хемолитотрофных бактерий лежит их отношение к источнику энергии. В зависимости от видовой принадлежности они способны использовать в качестве энергетического субстрата элементарную серу, тиосульфат, тетратионат, сульфиды металлов, сероводород [1-7]. Перечисленные в таблице 1 культуры, независимо от источника выделения и отношения к температуре, окисляли неорганические и органические соединения серы, двухвалентное железо, не росли на полноценных питательных средах (МПА, МПБ), были способны выщелачивать металлы из техногенных отходов (таблица 2). Результаты изучения биологических свойств изолированных культур позволили отнести МФLv37, МФLv69, МФLad27 и МФLad73 к представителям рода *Acidithiobacillus*. Способность МФLv37 и МФLad27 окислять кроме соединений серы и двухвалентное железо позволяет предположить их принадлежность к *Acidithiobacillus ferrooxidans*, так как это единственный представитель ацидофильных хемолитотрофных тионовых бактерий, способный окислять двухвалентное железо, кроме перечисленных соединений серы. Механизм бактериального выщелачивания металлов при окислении железа достаточно сложный процесс и может

Таблица 2 – Основные свойства мезофильных и умеренно термофильных бактерий, изолированных из техногенных отходов различного происхождения

Биологические свойства изученных культур	Изученные штаммы					
	мезофильные				умеренно термофильные	
	<i>A.sp.</i> МФLv37	<i>A.sp.</i> МФLv69	<i>A.sp.</i> МФLad27	<i>A.sp.</i> МФLad73	<i>S.sp.</i> Lv35	<i>S.sp.</i> УТФLad29
Морфология клетки	короткие тонкие мелкие палочкоподобные клетки, одиночные, расположенные попарно	короткие тонкие слегка изогнутые палочкоподобные клетки в коротких цепочках	мелкие тонкие с закругленными концами одиночные палочкоподобные клетки	короткие тонкие мелкие палочкоподобные клетки в цепочках	короткие толстые с закругленными концами одиночные клетки	кокковидные толстые короткие клетки в небольших скоплениях
Окраска по Граму	«-»	«-»	«-»	«-»	«+»	«+»
Значения pH						
Диапазон	0,9 – 5,0	0,9 – 5,0	0,9 – 5,0	0,9 – 5,0	3,0 – 6,0	3,0 – 6,0
Оптимальные значения	3,0	3,0	3,0	3,0	4,5	4,5
Температура, °C						
Диапазон	4,0-37,0	4,0-37,0	4,0-37,0	4,0-37,0	15,0 – 55,0	15,0 – 55,0
Оптимальные значения	32,0±2,0	32,0±2,0	32,0±2,0	32,0±2,0	50,0±2,0	50,0±2,0
Источники энергии						
S ⁰	«+»	«+»	«+»	«+»	«+»	«+»
S ⁺²	«+»	«+»	«+»	«+»	«+»	«+»
TM	«+»	«+»	«+»	«+»	«+»	«+»
FeSO ₄	«+»	«-»	«+»	«-»	«+»	«+»
Na ₂ S ₂ O ₅	«+»	«+»	«+»	«+»	«+»	«+»
Потребность в дополнительных факторах роста	«-»	«-»	«-»	«-»	«+»	«+»
Рост на МПА	«-»	«-»	«-»	«-»	«-»	«-»
Выщелачивание металлов из техногенных отходов	«+»	«+»	«+»	«+»	«+»	«+»

протекать за счет окислительно-восстановительного цикла $Fe^{+2} \leftrightarrow Fe^{+3}$ соединений железа, присутствующих в сырье:



а сульфат железа, который является сильным окислителем, в свою очередь реагирует с целым рядом сульфидов металлов

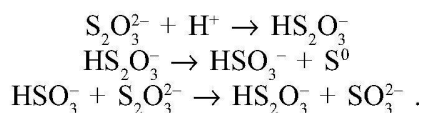


В результате чего нерастворимые сульфиды металлов превращаются в растворимые сульфаты [1, 9, 18]. Кроме того, *Acidithiobacillus ferrooxidans* способен разрушать широкий на-

бор сульфидных минералов – пирит, марказит, полидимит, реальгар, халькопирит, молибденит, кобальтин, ковеллин, марматит, виоларит. Использование в качестве источников энергии широкого круга окисляемых субстратов, устойчивость к ионам тяжёлых металлов и низким значениям pH, а также высокий уровень изменчивости обуславливают ведущую роль *A. ferrooxidans* в бактериально-химических процессах выщелачивания металлов из природных и техногенных субстратов и определяет интенсивность исследований его физиологии, биохимии и генетики.

Два других мезофильных штамма МФLv69 и МФLad73, не отличаясь по основным культурально-морфологическим признакам, окисляли элементную серу и ее восстановленные соеди-

нения – тиосульфат, тетратионат, но не использовали в качестве источника энергии двухвалентное железо (таблица 2). Эти штаммы в процессе роста практически полностью окисляли тиосульфат – снижение его концентрации регистрировали на 83,0 и 86,3 % для МФЛad73 и МФЛv69, соответственно. Полученные результаты позволяют предположить, что окисление тиосульфата происходит по следующей схеме:



Таким образом, характеристика МФЛv69 и МФЛad73, полученная в результате изучения свойств этих культур, дает возможность считать их другими представителями рода *Acidithiobacillus*, а именно *Acidithiobacillus thiooxidans*. Согласно имеющимся литературным данным, *Acidithiobacillus thiooxidans* играет менее значительную роль в биовыщелачивании металлов из сульфидных руд; зачастую встречается в тесной ассоциации с *Acidithiobacillus ferrooxidans* [1, 4, 18].

Диапазон и оптимальные значения температуры для роста и окисления энергетического субстрата, а также потребность в дополнительных факторах роста (дрожжевой экстракт) позволяют предположить, что УТФЛv35 и УТФЛad29 относятся к роду *Sulfobacillus*. Эти бактерии, как и представители рода *Acidithiobacillus*, способны к автотрофному росту. Однако оптимальный тип питания – миксотрофный, когда одновременно используются метаболические пути окисления неорганических и органических соединений – глюкозы, дрожжевого экстракта, а источниками энергии служат сера, ее восстановленные соединения (тиосульфат, тетратионат и др.), двухвалентное железо, сульфидные минералы. Представители этого рода были выделены из сульфидных руд и термальных источников, многие из них еще достаточно не изучены [4-6].

Результаты изучения основных биологических свойств изолированных культур не противоречат современным литературным данным. Однако окончательный вывод о систематическом положении изученных штаммов можно сделать только после проведения исследований с использованием молекулярно-генетических методов. Поэтому в дальнейшей работе мезофильные штаммы, изолированные из породных отвалов и золы-уноса в качестве окончательно

неидентифицированных, были определены, как *A. sp.* МФЛv37, *A. sp.* МФЛad27, *A. sp.* МФЛv69 и *A. sp.* МФЛad73, а умеренно термофильные – как *S. sp.* УТФЛv35 и *S. sp.* УТФЛad29.

Результаты работ по бактериальному выщелачиванию металлов из породных отвалов и золы-уноса свидетельствуют о том, что как мезофильные, так и умеренно термофильные штаммы отличались высокой выщелачивающей активностью (рисунки 3 и 4). В условиях наших экспериментов под воздействием мезофильных штаммов *A. sp.* МФЛv37 и *A. sp.* МФЛad27 из отходов углеобогащения и энергетики в раствор одинаково эффективно переходили германий, галлий, медь и кадмий (рисунки 3 и 4). При этом необходимо отметить, что в породных отвалах и золе-уносе концентрации германия (26,0 и 28,0 мг/кг), галлия (10,0 и 12,0 мг/кг), меди (62,2 и 68,2 мг/кг) и кадмия (2,8 и 5,3 мг/кг) практически не отличаются.

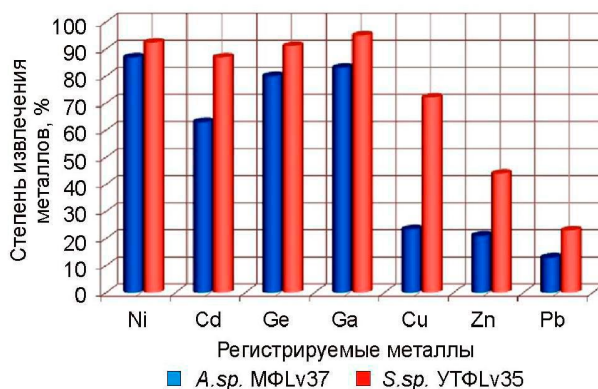


Рисунок 3 – Степень извлечения металлов штаммами *A. sp.* МФЛv37 и *S. sp.* УТФЛv35 из породных отвалов ЦОФ Львовско-Волынского угольного бассейна

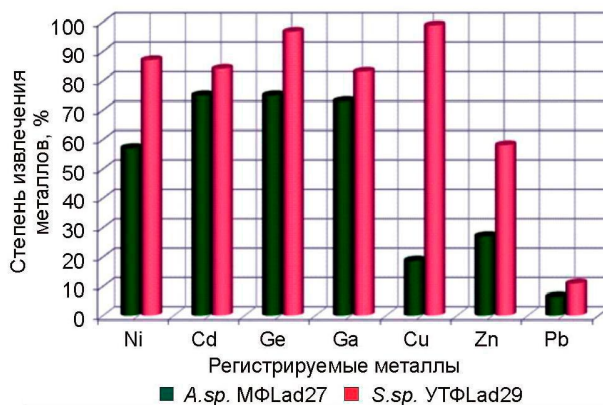


Рисунок 4 – Степень извлечения металлов штаммами *A. sp.* МФЛad27 и *S. sp.* УТФЛad29 из золы-уноса Ладыжинской ТЭС

Сравнительный анализ приведенных результатов свидетельствует о том, что эффективность извлечения этих металлов из исследуемых техногенных отходов незначительно – в 1,2-1,4 раза была выше при использовании умеренно термофильных штаммов *S.sp.* Lv35 и *S.sp.* Lad29, по сравнению с мезофильными (рисунки 3 и 4). Согласно полученным результатам, умеренно термофильные штаммы увеличивали переход меди в раствор из породных отвалов и золы-уносов в 3-5 раз соответственно. Следовательно, можно предположить, что извлечение металлов из исследованных отходов определяет в первую очередь активность изученных штаммов, как мезофильных, так и умеренно термофильных.

Концентрация цинка и свинца в золе-уносе Ладыжинской ТЭС (327,3 и 112,5 мг/кг) практически в 3 раза выше их содержания в породных отвалах ЦОФ (108,7 и 42,2 мг/кг). Извлечение цинка мезофильными и умеренно термофильными штаммами подчинялось выявленной уже закономерности: переход цинка из породных отвалов и золы-уноса мезофильными штаммами был практически одинаковым; умеренно термофильные штаммы увеличивали этот показатель в 2 раза независимо от типа отходов. Извлечение свинца независимо от отходов и используемых штаммов было минимальным. Однако степень извлечения свинца *A.sp.* МФLv37 и *S.sp.* Lv35 из породных отвалов была вдвое выше, чем *A.sp.* МФLad27 и *S.sp.* Lad29 из золы-уноса (рисунки 3 и 4). В данном случае это вполне объяснимо не только активностью штаммов, но и более низким содержанием металла.

В отдельной серии экспериментов при выщелачивании металлов были использованы мезофильные штаммы *A.sp.* МФLv69 и *A.sp.* МФLad27, окисляющие тиосульфат и не окисляющие двухвалентное железо. Результаты приведены на рисунке 5.

Использование мезофильных штаммов *A.sp.* МФLv69 и *A.sp.* МФLad73, которые в качестве энергетического источника используют тиосульфат, а не железо, выявило их высокую выщелачивающую активность. Отличительной особенностью данных штаммов была высокая степень выщелачивания меди и никеля (рисунок 5). Этот факт дает возможность использования *A.sp.* МФLv69 и *A.sp.* МФLad73 для селективного извлечения меди и никеля из природных медно-никелевых руд и техногенных отходов с высоким содержанием этих металлов.

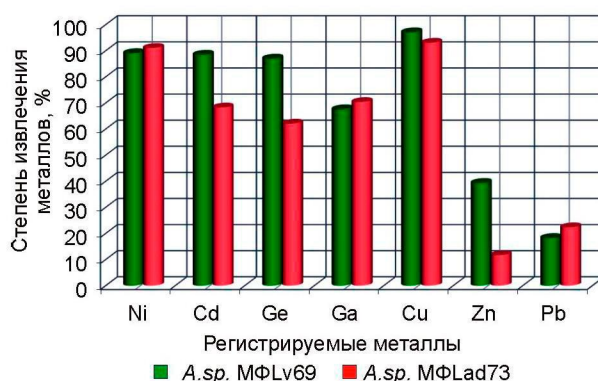


Рисунок 5 – Степень извлечения металлов штаммами *A.sp.* МФLv69 из породных отвалов ЦОФ и *A.sp.* МФLad73 из золы-уносов Ладыжинской ТЭС

Выводы. Проведенные исследования показали, что изолированные, отобранные и изученные чистые культуры мезофильных и умеренно термофильных ацидофильных хемолитотрофных бактерий, окисляющие железо, способны с высокой эффективностью извлекать металлы из техногенных отходов углеобогащения и энергетики. Не менее активными оказались мезофильные штаммы *A.sp.* МФLv69 и *A.sp.* МФLad27, использующие тиосульфат как источник энергии. Установлено, что наиболее активными оказались умеренно термофильные штаммы *S.sp.* УТФЛв35 и *S.sp.* УТФЛад29, которые окисляют широкий спектр источников энергии. Сравнительный анализ полученных результатов показал, что эффективность бактериального выщелачивания металлов из твердого техногенного сырья зависит от используемого штамма, природы металла и его концентрации в сырье.

Полученные результаты позволяют рекомендовать биологическое выщелачивание с участием выделенных активных штаммов как эффективный и перспективный способ вторичной переработки техногенных отходов предприятий угольной и энергетической промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Каравайко Г.И., Дубинина Г.А., Кондратьева Т.Ф. Литотрофные микроорганизмы окислительных циклов серы и железа // Микробиология. – 2006. – Т. 75, № 5. – С. 593-629.
- 2 Gholami R.M., Borghei S.M., Mousav, S.M. Bacterial leaching of a spent Mo-Co-Ni refinery catalyst using *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* // Hydrometallurgy. – 2001. – V. 106. – P. 26-31.
- 3 Bai J., Wang J. Xu, Bo Liang. Bioleaching of metals from printed wire boards by *Acidithiobacillus*

ferrooxidans and Acidithiobacillus thiooxidans and their mixture // Minerals Engineering. – 2011. – V. 24. – P. 1128-1131.

4 Blayda I.A. The composition and activity of microbial community waste coal // Biotechnologia Acta. – 2014. – V. 7 (5). – P. 94-100.

5 Bogdanova T.I., Tsaplina I.A., Kondrat'eva T.F. Sulfobacillus thermotolerans sp. nov., a thermotolerant chemolithotrophic bacterium // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. – 2006. – V. 56. – P. 1039-1042.

6 Каравайко Г.И., Турова Т.П., Цаплина И.А., Богданова Т.И. Филогенетическое положение аэробных умеренно термофильных бактерий вида Sulfobacillus, окисляющих Fe^{2+} , $S^{(0)}$ и сульфидные минералы // Микробиология. – 2000. – Т. 69, № 6. – С. 857-860.

7 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. – V. 142. – P. 775-783.

8 Методы общей бактериологии. Т. 2. – М.: Мир, 1984. – 265 с.

9 Вайнштейн М.Б. К методикам учета тионовых бактерий // Микробиология. – 1981. – Т. 50, вып. 2. – С. 333-337.

10 Каравайко Г.И. Практическое руководство по биоготехнологии металлов. – М.: АН СССР, 1989. – 371 с.

11 Соколова Г.А., Каравайко Г.И. Физиология и геологическая деятельность тионовых бактерий. – М.: Наука, 1964. – 332 с.

12 Современная микробиология. Прокариоты. Под ред. Ленгелера Й., Древиса Г. и Шлегеля Г. / Пер. с англ. / Под ред. Нетрусова А.И. – М.: Мир. – 2005. – Т. 2. – С. 178-180.

13 Хавезов И., Цалев Д. Атомно-абсорбционный анализ. – Л.: Химия, 1983. – 144 с.

14 Назаренко В.А. Аналитическая химия германия. – М.: Наука, 1973. – 264 с.

15 Дымов А.М., Савостин А.П. Аналитическая химия галлия. – М.: Наука, 1968. – 256 с.

16 Блайда И.А. Извлечение ценных металлов при переработке промышленных отходов биотехнологическими методами (Обзор) // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – № 6. – С. 39-45.

17 Блайда И.А., Васильева Т.В., Слюсаренко Л.И., Хитрич В.Ф., Иваница В.А. Извлечение редких и цветных металлов сообществом микроорганизмов из золы от сжигания павлоградского угля // Микробиология и биотехнология. – 2012. – № 3. – С. 91-100.

18 Кузякина Т.И., Хайнасова Т.С., Левенец О.О. Биотехнология извлечения металлов из сульфидных руд // Вестник наук о Земле. – 2008. – Т. 60, вып. 12. – С. 76-85.

REFERENCES

1 Karavajko G.I., Dubinina G.A., Kondrat'eva T.F. Litotrofnye mikroorganizmy oksitel'nykh tsiklov sery i zheleza (Lithotrophic microorganisms for sulfur and

iron oxidizing cycles). Mikrobiologiya = Microbiology. 2006, 75 (5). 593-629 (in Russ.).

2 Gholami R.M., Borghei S.M., Mousav S.M. Bacterial leaching of a spent Mo-Co-Ni refinery catalyst using Acidithiobacillus ferrooxidans and Acidithiobacillus thiooxidans. Hydrometallurgy. 2001. 106. 26-31 (in Eng.).

3 Bai J., Wang J. Xu, Bo Liang. Bioleaching of metals from printed wire boards by Acidithiobacillus ferrooxidans and Acidithiobacillus thiooxidans and their mixture. Minerals Engineering. 2011. 24. 1128-1131 (in Eng.).

4 Blayda I.A. The composition and activity of microbial community waste coal // Biotechnologia Acta. 2014. 7 (5). – 94-100 (in Eng.).

5 Bogdanova T.I., Tsaplina I.A., Kondrat'eva T.F. Sulfobacillus thermotolerans sp. nov., a thermotolerant chemolithotrophic bacterium. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2006. 56. 1039-1042 (in Eng.).

6 Karavajko G.I., Turova G.I., Tsaplina I.A., Bogdanova T.I. Filogeneticheskoe polozhenie aerobnykh umerenno termofilnykh bakterij vida Sulfobacillus, oksilyayushchikh Fe^{2+} , $S^{(0)}$ i sulfidnye mineraly (The phylogenetic position of aerobic moderately thermophilic bacteria species Sulfobacillus, oxidizing Fe^{2+} , $S^{(0)}$ and sulfide minerals). Mikrobiologiya = Microbiology. 2000. 69 (6). 857-860 (in Russ.).

7 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. 775-783 (in Eng.).

8 Metody obshchey mikrobiologii. (Methods of general microbiology). Moscow: Mir. 1984. 2. 265 (in Russ.).

9 Vajnshteyn M.B. K metodikam ucheta tionovykh bakterij. (To methodologies of account of tiobacteria). Mikrobiologiya=Microbiology. 1981. 50. 2. 333-337 (in Russ.).

10 Karavajko G.I. Prakticheskoe rukovodstvo po biogotekhnologii metallov (Guide to biogototechnology of metals). Moscow: AN USSR. 1989. 371 (in Russ.).

11 Sokolova G. A., Karavajko G.I. Fiziologicheskaya i geologicheskaya deyatel'nost' tionovykh bakterij (Physiological and geological activity of tiobacteria). Moscow: Nauka, 1964. 332 (in Russ.).

12 Sovremennaya mikrobiologiya. Prokarioty. (Modern microbiology. Prokaryotes). Under editorship of Y. Lengler, G. Drevis, G. Schlegelay. Translated from English under editorship of Netrusova A.I. Moscow: Mir. 2005. 2. 178-180 (in Russ.).

13 Havezov I., Calev D. Atomno-absorbtsionnyy analiz. (Atomic absorption analysis). Leningrad: Khimiya (Chemistry). 1983. 144 p. (in Russ.).

14 Nazarenko V.A. Analiticheskaya khimiya germaniya (Analytical chemistry of germanium). Moscow: Nauka (Science). 1973. 264 (in Russ.).

15 Dymov A.M., Savostin A.P. Analiticheskaya khimiya galliya (Analytical chemistry of gallium). Moscow: Nauka (Science). 1968. 256 (in Russ.).

16 Blayda I.A. *Iz vlechenie tsennykh metallov pri pererabotke promyshlennykh otkhodov biotekhnologicheskimi metodami* (Extraction of precious metals in the processing of industrial waste by biotechnological methods) *Ehnergotekhnologii i resursosbezrezhenie = Power Technologies and resources*. **2010**, 6. 39-45 (in Russ.).

17 Blayda I.A., Vasil'eva T.V., Slusarenko L.I., Khitrich V.F., Ivanitza V.A. *Iz vlechenie redkikh i tsvetnykh metallov soobshchestvom mikroorganizmov iz*

zoly ot sgoraniya pavlogradskogo uglya (Extraction of rare and non-ferrous metals by association of microorganisms from an ash of pavlograd coal incineration). *Mikrobiologiya i Biotekhnologiya = Microbiology and Biotechnology*. **2012**. 3. 91-100 (in Russ.).

18 Kuzyakina T.I., Khajnasova T.A., Levenets O.O. *Biotechnologiya iz vlecheniya metallov iz sulfidnykh rud*. (Biotechnology extraction of metals from sulphide ores). *Vestnik nauk o Zemle = Bulletin of Earth Sciences*. **2008**. (60). 12. 76-85 (in Russ.).

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада көмір байытатын және энергетика кәсіпорындарының техногенді қалдықтарынан бөлектенген ацидофилді хемолитотрофты бактериялар өсірінділерін кешенді зерттеудің қорытындылары келтірілген. Жұмысты орындау кезінде классикалық микробиологиялық және химиялық зерттеу әдістері пайдаланылды. 6 бөлектенген және таңдап алынған өсірінділердің негізгі биологиялық қасиеттері зерттелді, олар: автотрофты және миксотрофты өсу ерекшеліктері, өртүрлі энергия көздеріне қарым-қатынасы, техногенді қалдықтардан металдарды ерітінділеу қабілеттілігі. Жаңадан бөлектенген өсірінділердің бұрынғы табиғи сульфидті оймалардан алынған және әдебиеттік дереккөздерде жазылған өсірінділерге ұқсастығы анықталды. Мақалада темір мен тиосульфаттың ацидофилді хемолитотрофты бактериялармен бактериалды-химиялық тотығуының мүмкін болатын механизмі баяндалған. Зерттелген өсірінділер өртүрлі филогенетикалық алшақ топтарға – *Acidithiobacillus* текті грамтеріс бактерияларға және *Sulfobacillus* текті грамоң бактерияларға жатады. Бактериялардың зерттелген өсірінділері үшін ЦОФ Львовск-Волыньск көмір бассейнінің жыныстық үйінділерінен және Ладыжинск ЖЭС-ында жағылған көмірдің алып кететін күлдерінен металдарды бөліп алудың тиімділігі жоғары болатыны көрсетілді. Көмір байытудың және энергетиканың қалдықтарынан бөлектенген *A.sp.* МФЛv37 және *A.sp.* МФЛad27 мезофилді штамдары күкіртті, оның тотықсызданған қосылыстарын және екі валентті темірді тотықтырады. Басқа екеуі – *A.sp.* МФЛv69 және *A.sp.* МФЛad73 темірді энергия көзі ретінде пайдаланбайды. Пайдаланатын энергия көзіне тәуелсіз бұл штамдар жоғары ерітінділейтін белсенділігімен ерекшеленеді: сирек металдар – германий мен галлийдің бөліну тиімділігі сәйкес 79,8-86,9 және 70,33-83,0 % құрайды. Алынған нәтижелерді салыстырмалы түрде жасаған талдау қорытындысы – бөліну көзіне қарамай ең белсенді *S.sp.* УТФЛv35 және *S.sp.* УТФЛad29 орташа термофилді штамдар болатынын айғақтайды.

Түйінді сөздер: көмір байытудың жыныстық үйінділері, алып кететін күл, бактериалды ерітінділеу, мезофилді, орташа термофилді хемолитотрофты бактериялар, германий, галлий, уытты металдар.

SUMMARY

The results of a comprehensive study of chemolithotrophic acidophilus bacteria cultures isolated from industrial wastes of coal-concentrating and power companies are shown in the article. The classic microbiological and chemical research methods were used in the work. The basic biological properties were studied for six isolated bacterial cultures: characteristics of autotrophic and mixotrophic growth, attitude towards the various sources of energy, the ability to leach metals from industrial wastes. A similarity of newly isolated cultures to previously isolated from the natural sulphide niches and described in the literature was confirmed. The probable mechanism of bacterial-chemical oxidation of iron and thiosulfate by chemolithotrophic acidophilic bacteria considered in the article. Isolated strains belong to different cultures and phylogenetically distant groups – gram-negative bacteria genus *Acidithiobacillus* and gram-positive genus *Sulfobacillus*. The high efficiency of metals extraction from waste dumps of central concentrator factory of Lviv-Volyn Coal Basin and from fly ash of coal-burning power plants in the Ladyzhynskaya was showed for studied bacterial cultures. The mesophilic strains *A.sp.* MFLv37 and *A.sp.* MFLad27 isolated from industrial wastes of coal-concentrating and power companies oxidize sulfur and its reduced compounds and iron (ferrous). Two other strains – *A.sp.* MFLv69 and *A.sp.* MFLad73 did not use iron as an energy source. Independently on the source of energy, these strains have highly leaching activity: efficiency of extraction of rare metals – germanium and gallium was 79,8-86,9 and 70,33-83,0 %. The comparative analysis of the results shows that, no matter where the strain was isolated, the most active were moderately thermophilic strains of *S.sp.* UTFLv35 and *S.sp.* UTFLad29.

Key words: coal-concentrating waste dumps, fly ash, bacterial leaching, mesophilic and moderately thermophilic chemolithotrophic bacteria, germanium, gallium, toxic metals.

Поступила 08.10.2015