

DOI: 10.15593/2224-9400/2021.2.04

УДК 66.061.34+579.66

Л.С. Пан, О.И. Бахирева, Е.А. Цыпкина

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ КОБАЛЬТА ИЗ СУЛЬФИДНЫХ РУД

В настоящее время все чаще используют бактериальное выщелачивание для извлечения цветных металлов. Это связано с тем, что оно позволяет извлекать металлы из бедных руд, с незначительным количеством металлов, отходов, шлаков. Бактериальные методы выщелачивания относятся к одному из современных направлений научно-технического прогресса в области переработки минерального сырья – биотехнологии металлов, которая позволяет значительно повысить комплексность использования этого сырья, культуру производства, обеспечить эффективную защиту окружающей среды, а также не требует создания сложных горнодобывающих комплексов. Внедрение бактериального выщелачивания имеет большое экономическое значение.

*В данной работе выделены микроорганизмы рода *Thiobacillus ferrooxidans* из шахтной воды (г. Кизел) на среде Сильвермана и Люндгрена 9К. Изучена их толерантность по отношению к ионам кобальта. Проведена оценка перспективности использования выделенных микроорганизмов рода *Thiobacillus ferrooxidans* выщелачивать кобальт из сульфидных руд. Показано, что, используя данные микроорганизмы, можно извлекать кобальт из сульфидных руд в 2,3 раза быстрее по сравнению с растворением сульфида кобальта в отсутствие микроорганизмов.*

*Рассмотрена возможность извлечения кобальта из сложных по составу сульфидных руд, содержащих значительное количество никеля, меди с помощью микроорганизмов рода *Thiobacillus ferrooxidans*. Доказано, что с помощью выделенных микроорганизмов можно извлекать кобальт, медь и никель из сложных по составу сульфидных руд. Было установлено, что микроорганизмы рода *Thiobacillus ferrooxidans* более избирательны к ионам кобальта в процессе выщелачивания из смешанных сульфидных руд.*

Ключевые слова: микробиологическое выщелачивание кобальта из сульфидных руд, микроорганизмы рода *Thiobacillus ferrooxidans*, избирательность к ионам кобальта в процессе комплексного выщелачивания из сульфидных руд.

L.S. Pan, O.I. Bakhireva, E.A. Tsyapkina

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

MICROBIOLOGICAL LEACHING COBALT FROM SULFIDE ORES

Nowadays, bacterial leaching is increasingly used to recover non-ferrous metals. This is due to the fact that it allows to extract metals from low-grade ores, with a minor amount of metals, wastes and slags. Bacterial leaching methods are one of the modern directions of scientific and technological progress in the field of mineral processing, i.e., biotechnology of metals. The technology makes it possible to significantly increase the complexity of the use of these raw materials, the culture of production, and to provide effective protection of the environment. The introduction of bacterial leaching is of great economic importance.

*In this work, microorganisms of the genus *Thiobacillus ferrooxidans* were isolated from mine water (the city of Kizel) on the medium of Silverman and Lundgren 9K. The tolerance of microorganisms towards cobalt ions has been studied. The assessment of the perspective of using isolated microorganisms of the genus *Thiobacillus ferrooxidans* to leach cobalt from sulfide ores has been carried out. It has been shown that it is possible to extract cobalt from sulfide ores using these microorganisms 2.3 times faster than the dissolution of cobalt sulfide in the absence of microorganisms.*

*The possibility of extracting cobalt from complex sulfide ores containing a significant amount of nickel and copper using microorganisms of the genus *Thiobacillus ferrooxidans* has been considered.*

*The extraction of cobalt, copper and nickel from complex sulfide ores using these microorganisms has been proven. Has been established that microorganisms of the genus *Thiobacillus ferrooxidans* are more selective to cobalt ions in the process of leaching from mixed sulfide ores.*

Keywords: *microbiological leaching of cobalt from sulfide ores, microorganisms of the genus *Thiobacillus ferrooxidans*, selectivity to cobalt ions in the process of complex leaching from sulfide ores.*

Задача настоящего времени – создание конкурентоспособного, ресурсосберегающего и экологически чистого производства извлечения цветных металлов с применением бактериального выщелачивания. Простота аппаратуры для бактериального выщелачивания, возможность быстрого размножения бактерий, особенно при возвращении в процесс отработанных растворов, содержащих живые организмы, открывает возможность не только резко снизить себестоимость получения ценных полезных ископаемых, но и значительно увеличить сырьевые ресурсы за счет использования бедных, забалансовых и потерянных руд в месторождениях, отвалов из отходов обогащения, пыли, шлаков и т.д. [5, 7, 8, 10, 11, 16]. В перспективе бактериальное выще-

лачивание открывает возможность создания полностью автоматизированных предприятий по получению металлов из забалансовых и потерянных руд непосредственно из недр Земли, минуя сложные горно-обогатительные комплексы [2, 6].

Отечественными и зарубежными микробиологами выявлено множество потенциально полезных бактерий и архей, способствующих окислению сульфидных минералов [3, 4, 12, 17], однако характеристика большинства наиболее активных штаммов остается неполной. Многие из описанных к настоящему времени микроорганизмов, применяемых в биогеотехнологии, были обнаружены как в природных, так и в промышленных условиях, например, вблизи серных геотермальных источников и в рудничных водах [1, 9, 14]. Тионовые бактерии – это наиболее важная в геохимическом отношении группа, хорошо изученная физиологически и биохимически. Все тионовые бактерии способны использовать энергию окисления восстановленных соединений серы в серную кислоту для ассимиляции углерода, построения клеточного тела и осуществления всех остальных функций. Некоторые из тионовых бактерий могут использовать для своей жизнедеятельности, кроме окисления серы, окисление других соединений, например, органических веществ или закисного железа. Данная способность широко используется в промышленном выщелачивании металлов из руд мезофильными микроорганизмами [3, 4, 13, 15].

Развитие биовыщелачивания за счет применения новых организмов, а не технологических изменений остается одним из перспективных и развивающихся направлений гидрометаллургии и обогащения руд.

Цель настоящего исследования заключается в поиске и выборе метода и оптимальных условий выщелачивания руд цветных металлов, содержащих кобальт, с использованием микроорганизмов.

В данной работе для выделения бактерий рода *Thiobacillus ferrooxidans* была взята шахтная вода (г. Кизел). В среду Сильвермана и Люндгрена объемом 100 мл добавляли 10 мл шахтной воды и каждые сутки измеряли оптическую плотность. В результате были получены колонии одного рода: цвет – белый, форма – круглая. Окраска по Граму показала, что выделенные бактерии – грамотрицательные, что подтверждает принадлежность к тионовым бактериям рода *Thiobacillus ferrooxidans*.

Для построения кривой роста было взято 100 мл среды Сильвермана и Люндгрена 9 К с выделенными микроорганизмами (м/о). В течение 7 суток измеряли изменение оптической плотности. На рис. 1

приведены результаты построения кривой роста. Все эксперименты проводили в трех повторностях. Полученная зависимость показывает, что максимальный рост выделенных микроорганизмов происходит на третьи сутки.

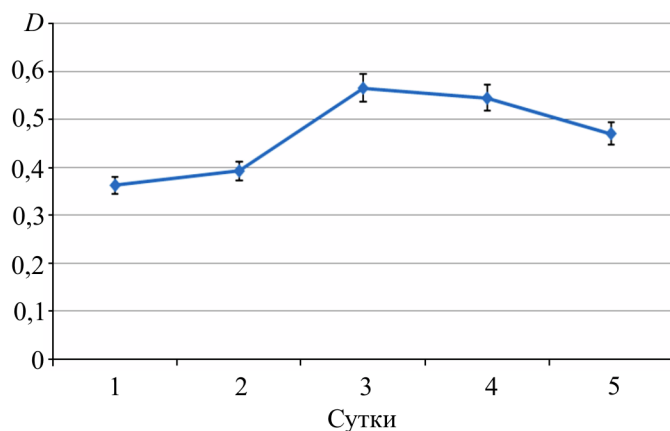


Рис. 1. Кривая роста выделенных микроорганизмов

Изучена толерантность выделенных микроорганизмов по отношению к кобальту. Интервал концентраций ионов Co^{2+} изменяли от 0,1 до 30 мг/л. Полученные результаты показаны на рис. 2. Приведены значения оптической плотности через 3 и 5 ч культивирования микроорганизмов при разных концентрациях ионов кобальта в растворе.

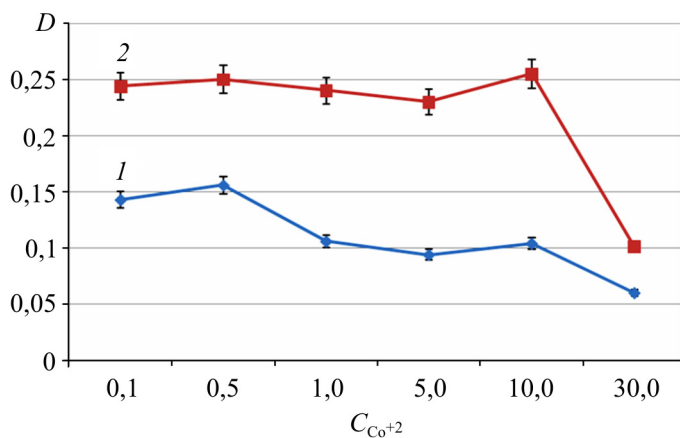


Рис. 2. Кривая роста *Thiobacillus ferrooxidans* от концентрации кобальта в растворе: 1 – через 3 ч; 2 – через 5 ч (D – оптическая плотность в среде культивирования микроорганизмов; $C_{\text{Co}^{+2}}$ – концентрация кобальта в растворе, мг/л)

Изучение толерантности выделенных бактерий по отношению к кобальту показало, что содержание кобальта в растворе до концентрации 10 мг/л не угнетает рост микроорганизмов (м/о).

Для изучения возможности использования выделенных м/о для выщелачивания кобальта из сульфидных руд был проведен опыт, в котором в статических условиях в колбу помещали 2,3 г. CoS и добавляли 100 мл среды 9 К. Для сравнения было рассмотрено выщелачивание кобальта в присутствии м/о и без них. Концентрацию кобальта в водном растворе определяли фотометрическим методом в виде комплекса с нитрозо-R-солью. Оптическую плотность полученного раствора измеряли на фотоэлектроколориметре с длиной волны $\lambda = 420$ нм, в кювете с толщиной слоя 2 см, применяя в качестве эталона сравнения раствор холостого опыта. Полученные экспериментальные данные представлены в табл. 1 (результаты приведены в трех повторностях).

Таблица 1

Результаты выщелачивания CoS выделенными микроорганизмами

Время, сут	C_{Co+2} , мг/л (с м/о)	Степень выщелачивания, %	C_{Co+2} , мг/л (без м/о)	Степень выщелачивания, %
1	18,1	12,06	12,6	8,40
	16,2		12,1	
	17,9		13,9	
2	46,4	30,93	24,3	16,25
	46,2		26,1	
	46,7		28,6	
3	96,5	64,33	42,7	28,46
	101,5		42,1	
	98,3		45,8	
4	126,2	84,13	85,2	56,82
	128,3		86,3	
	130,2		87,2	
5	135,9	90,6	118,3	78,86
	135,8		115,6	
	132,5		120,2	

Количество кобальта в анализируемом растворе рассчитывали по формуле

$$X = \frac{a \times 1000}{b \times 1000} = \frac{a}{b}, \quad (1)$$

где X – концентрация кобальта в вытяжке, мг/л; a – количество кобальта, найденное в анализируемой пробе по калибровочному графику, мкг; b – объем анализируемого раствора, взятого на определение, мл.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения выделенных тионовых бактерий для выщелачивания пород, содержащих сульфиды кобальта. Действительно, полученные микроорганизмы увеличивают степень выщелачивания кобальта в первые сутки в 1,5 раза, на вторые – 1,9 раза, на третьи – 2,26 раза, на четвертые – 1,48 раз, на пятые – 1,15 раз, по сравнению с растворением сульфида кобальта в отсутствие микроорганизмов.

Таким образом, применение микроорганизмов рода *Thiobacillus ferrooxidans* позволяет существенно увеличить скорость выщелачивания кобальта из сульфидных руд и значительно упрощает технологический процесс.

Поскольку природные руды кобальта содержат значительные примеси сульфидов других металлов, особенно меди и никеля, представляло интерес изучить избирательность выделенных микроорганизмов к ионам кобальта на фоне больших количеств никеля и меди.

Для проведения опыта по комплексному выщелачиванию были приготовлены сульфиды металлов (CoS, CuS, NiS). Затем эти осадки в количественной пропорции 1:10:6 соответственно поместили в 100 мл среды 9К. Выбор такого соотношения металлов, обусловлен тем, что в природных рудах количественное соотношение Co:Ni:Cu = 1:6:10. Было рассмотрено выщелачивание кобальта в присутствии м/о и без них. Полученные экспериментальные данные представлены в табл. 2 (результаты приведены в трех повторностях).

Из табл. 2 видно, что степень выщелачивания кобальта на пятые сутки в присутствии микроорганизмов достигает 85,46 и 70,93 % при растворении сульфида кобальта в отсутствие микроорганизмов. Наибольшая разница степени выщелачивания кобальта наблюдается на четвертые сутки и составляет 21,8 %. Наряду с выделением кобальта в раствор параллельно вымываются ионы меди и никеля. Представляло интерес рассмотреть избирательность выделенных микроорганизмов по отношению к выделяемым металлам. Поэтому в растворах выщелачивания были параллельно определены концентрации меди и никеля и вычислены проценты выщелачивания никеля и меди при их совместном присутствии в сульфидных минералах. Полученные результаты показаны на рис. 3 и 4.

Таблица 2

Результаты выщелачивания кобальта выделенными микроорганизмами в присутствии никеля и меди

Время, сут	C_{Co+2} , мг/л (с м/о)	Степень выщелачивания, %	C_{Co+2} , мг/л (без м/о)	Степень выщелачивания, %
1	10,6	7,06	8,6	5,73
	11,8		8,2	
	9,2		9,6	
2	24,8	16,53	14,5	9,66
	25,3		17,3	
	22,1		12,5	
3	82,3	54,86	57,2	38,13
	85,1		58,6	
	81,2		55,4	
4	116,3	77,53	83,6	55,73
	118,5		82,9	
	115,9		85,2	
5	128,2	85,46	106,4	70,93
	128,1		105,2	
	129,3		107,0	

Концентрации меди и никеля в растворах определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре марки – ice 3000 Series AA Spectrometers.

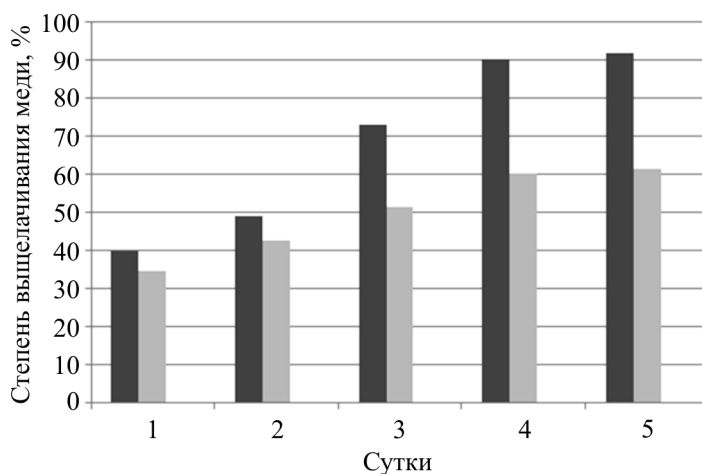


Рис. 3. Выщелачивание меди выделенными микроорганизмами в присутствии CoS, NiS (темные участки – с микроорганизмами, светлые участки – без микроорганизмов)

На рис. 3 видно, что степень выщелачивания меди на пятые сутки в присутствии микроорганизмов достигает 91,89 и 61,48 % при растворении сульфида меди в отсутствие микроорганизмов. Наибольшая разница степени выщелачивания меди наблюдается на четвертые сутки и составляет 30,13 %.

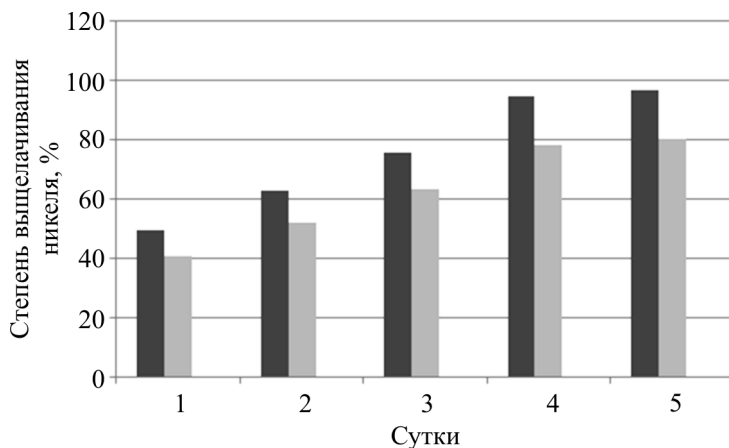


Рис. 4. Выщелачивание никеля выделенными микроорганизмами в присутствии CoS, CuS (темные участки – с микроорганизмами, светлые участки – без микроорганизмов)

Полученные результаты показывают, что степень выщелачивания никеля на пятые сутки в присутствии микроорганизмов достигает 96,87 и 80,22 % при растворении сульфида никеля в отсутствие микроорганизмов. Наибольшая разница степени выщелачивания никеля наблюдается на четвертые сутки и составляет 16,65 %.

Было показано, что степень выщелачивания кобальта из сульфидов в присутствии выделенных микроорганизмов достигает 85 % по сравнению с растворением сульфида кобальта в отсутствие микроорганизмов, где степень выщелачивания составляет 71 %. Также было установлено, что помимо кобальта выделенные микроорганизмы способны увеличивать степень выщелачивания меди и никеля. Однако микроорганизмы рода *Thiobacillus ferrooxidans* оказались более избирательны к ионам кобальта в процессе выщелачивания из сульфидных руд. Отношение концентрации ионов в растворе после выщелачивания $Co^{2+} : Cu^{2+} : Ni^{2+}$ составляет 1:6:4, в то время как в исходной смеси твердых веществ это соотношение было 1:10:6.

Как видно из табл. 3, эффективность микробиологического процесса выщелачивания кобальта при совместном присутствии сульфи-

дов меди и никеля со временем уменьшается и достигает на пятые сутки 5,7 % по сравнению с выщелачиванием кобальта из чистого CoS.

Таблица 3

Относительное понижение процента выщелачивания кобальта (Δ^*) в присутствии меди и никеля от времени

Время, сутки	X, % (степень выщелачивания Co из CoS)	Y, % (степень выщелачивания Co из смеси)	Z = X - Y	Δ , %
1	12,06	7,06	5	41,5
2	30,93	16,53	14,4	46,6
3	64,33	54,86	9,47	14,7
4	84,13	77,53	6,60	7,8
5	90,6	85,46	5,14	5,7

* Δ – падение процесса выщелачивания (%) кобальта в присутствии сульфидов никеля и меди, по сравнению с чистым CoS, определяли по формуле $\Delta = \frac{z}{x} \cdot 100\%$.

Таким образом, проведена оценка перспективности использования выделенных микроорганизмов рода *Thiobacillus ferrooxidans* выщелачивать кобальт из сульфидных руд. Установлено, что, используя данные микроорганизмы, можно извлекать кобальт из сульфидных руд в 2,3 раза быстрее по сравнению с растворением сульфида кобальта в отсутствие микроорганизмов. Показана целесообразность проведения первого цикла бактериально-химического выщелачивания в течение первых 3 суток.

Рассмотрена возможность извлечения кобальта из сложных по составу сульфидных руд, содержащих значительное количество никеля, меди с помощью микроорганизмов рода *Thiobacillus ferrooxidans*. Доказано, что с помощью выделенных микроорганизмов можно извлекать кобальт, медь и никель из сложных по составу сульфидных руд. Было установлено, что микроорганизмы рода *Thiobacillus ferrooxidans* более избирательны к ионам кобальта в процессе выщелачивания из сульфидных руд.

Список литературы

1. Брусничкина-Кириллова Л.Ю., Большаков Л.А. Исследование процесса бактериального выщелачивания техногенных отходов Норильского обогатительного производства // Цветные металлы. – 2009. – № 8. – С. 72–74.

2. Технологии бактериального выщелачивания металлов / М.Б. Вайнштейн, Т.Н. Абашина, А.Г. Быков, А.Е. Филонов, Л.Н. Крылова, Э.В. Адамов, В.В. Смолянинов // *Золото и технологии*. – 2010. – № 2 (9). – С. 48–50.

3. Состав бактериальных сообществ в отвалах сульфидных никелевых руд / М.Б. Вайнштейн, А.В. Вацурина, С.Л. Соколов, А.Е. Филонов, Э.В. Адамов, Л.Н. Крылова // *Микробиология*. – 2011. – № 80 (2). – С. 48–50.

4. Вацурина А.В., Вайнштейн М.Б., Панченко Е.А. Выщелачивание никелевых руд умеренно ацидофильными микроорганизмами // *Биотехнология: состояние и перспективы развития: материалы 5 междунар. Моск. конгр.* – 2009. – № 2. – С. 229–230.

5. Левенец О.О. Бактериально-химическое выщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды при разных плотностях пульпы // *Вестник ДВО РАН*. – 2014. – № 4. – С. 96–100.

6. Левенец О.О., Хайнасова Т.С., Балыков А.А. Кинетика бактериально-химического выщелачивания сульфидной руды на укрупненной биореакторной установке проточного типа при трех различных скоростях протока // *Успехи современного естествознания*. – 2018. – № 6. – С. 96–101.

7. Переработка упорных сульфидных концентратов, содержащих благородные металлы, на основе бактериального окисления / В.П. Мязин, Л.В. Шумилова, Г.Г. Минеев, В.В. Баранов // *Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология*. – 2017. – Т. 7, № 4. – С. 67–78.

8. Трофимова С.А., Савушкин А.И. Способы и комбинированные схемы переработки техногенного сырья посредством микробных агентов // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2016. – № 7-2. – С. 233–236.

9. Функциональная активность микроорганизмов в процессах добычи и переработки медно-никелевых руд Мурманской области / Н.В. Фокина, Е.С. Янишевская, А.В. Светлов, А.А. Горячев // *Вестник МГТУ*. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 109–116.

10. Dew D.W., Miller D.M. Copper, nickel and cobalt recovery. Patent U.S. 6245125, 2001.

11. Espejo RT, Romero J. Bacterial community in copper sulfide ores inoculated and leached with solution from commercial-scale copper leaching plant // *Appl Environ Microbiol*. – 1997. – № 63. – P. 1344–1348.

12. Electrochemical study of the catalytic influence of *Sulfolobus metallicus* in the bioleaching of chalcopyrite at 70 °C / H. Jordan, A. Sanhueza, V. Gautier, B. Escobar, T. Vargas // *Hydrometallurgy*. – 2006. – Vol. 83 (1-4). – P. 55–62.

13. UV induced mutations in *Acidianus brierleyi* growing in a continuous stirred tank reactor generated a strain with improved bioleaching capabilities / C. Meng, X. Shi, H. Lin, J. Chen, Y. Guo // *Enzyme and Microbial Technology*. – 2007. – Vol. 40 (5). – P. 1136–1140.

14. Visualisation of pyrite leaching by selected thermophilic archaea: Nature of microorganism–ore interactions during bioleaching / D. Mikkelsen, U. Kappler, R.I. Webb, R. Rasch, A.G. McEwan, L.I. Sly // *Hydrometallurgy*. – 2007. – Vol. 88 (1-4). – P. 143–153.

15. Rawlings D.E. Characteristics and adaptability of iron and sulfur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates // *Microbial Cell Factories*. – 2005. – Vol. 4, № 13. – P. 4–13.

16. Schippers A., Jozsa P.-G., Sand W. Sulfur chemistry in bacterial leaching of pyrite // *Appl. Environ. Microbiol.* – 1996. – Vol. 62 (9). – P. 3424–3431

17. A new strain *Acidithiobacillus albertensis* BY-05 for bioleaching of metal sulfides ores / J. Xia, A. Penga, H. Hea, Y. Yanga, X. Liu, G. Qiu // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2007. – Vol. 17 (1). – P. 168–175.

References

1. Brusnichkina-Kirillova L.YU., Bol'shakov L.A. Issledovanie processa bakterial'nogo vyshchelachivaniya tekhnogennyh otdodov noril'skogo obogatitel'nogo proizvodstva [Investigation of the process of bacterial leaching of man-made waste from the Norilsk dressing production]. *Cvetnye metally*, 2009, no. 8, pp. 72-74.

2. Vajnshtejn M.B., Abashina T.N., Bykov A.G., Filonov A.E., Krylova L.N., Adamov E.V., Smolyaninov V.V. Tekhnologii bakterial'nogo vyshchelachivaniya metallov [Technologies of bacterial leaching of metals]. *Zoloto i tekhnologii*, 2010, no. 2 (9), pp. 48-50.

3. Vajnshtejn M.B., Vacurina A.V., Sokolov S.L., Filonov A.E., Adamov E.V., Krylova L.N. Sostav bakterial'nyh soobshchestv v otvalah sul'fidnyh nikel'evykh rud [Composition of bacterial communities in dumps of nickel sulfide ores]. *Mikrobiologiya*, 2011, no. 80 (2), pp. 48-50.

4. Vacurina A.V., Vajnshtejn M.B., Panchenko E.A. Vyshchelachivanie nikel'evykh rud umerenno acidofil'nymi mikroorganizmami [Leaching of nickel ores by moderately acidophilic microorganisms]. *Materialy 5 Mezhdunarodnogo moskovskogo kongressa «Biotekhnologiya: sostoyanie i perspektivyrazvitiya»*, 2009, no. 2, pp. 229-230.

5. Levenec O.O. Bakterial'no-himicheskoe vyshchelachivanie sul'fidnoj kobal't-medno-nikel'evoy rudy pri raznykh plotnostyakh pul'py [Bacterial-chemical leaching of sulfide cobalt-copper-nickel ore at different pulp densities]. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk*, 2014, no. 4, pp. 96-100.

6. Levenec O.O., Hajnasova T.S., Balykov A.A. Kinetika bakterial'no-himicheskogo vyshchelachivaniya sul'fidnoj rudy na ukрупnennoj bioreaktornoj ustanovke protochnogo tipa pri trekh razlichnykh skorostyakh protoka [Kinetics of bacterial-chemical leaching of sulphide ore on an enlarged flow-type bioreactor unit at three different flow rates]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2018, no. 6, pp. 96-101.

7. Myazin V.P., SHumilova L.V., Mineev G.G., Baranov V.V. Pererabotka upornyh sul'fidnyh koncentratov, soderzhashchih blagorodnye metally, na osnove bakterial'nogo okisleniya [Processing of refractory sulfide concentrates containing noble metals based on bacterial oxidation]. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya himiya i biotekhnologiya*, 2017, vol.7, no. 4, pp. 67-78.

8. Trofimova S.A., Savushkin A.I. Sposoby i kombinirovannye skhemy pererabotki tekhnogenogo syr'ya posredstvom mikrobnih agentov [Methods and combined schemes for processing technogenic raw materials by means of microbial agents]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*, 2016, no. 7-2, pp. 233-236.

9. Fokina N.V., YAnishevskaya E.S., Svetlov A.V., Goryachev A.A. Funkcional'naya aktivnost' mikroorganizmov v processah dobychi i pererabotki medno-nikelevyh rud Murmanskoy oblasti [Functional activity of microorganisms in the processes of extraction and processing of copper-nickel ores in the Murmansk region]. *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 109-116.

10. Dew D.W., Miller D.M. Copper, nickel and cobalt recovery. Patent U.S. 6245125, 2001.

11. Espejo RT, Romero J. Bacterial community in copper sulfide ores inoculated and leached with solution from commercial-scale copper leaching plant. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1997, no. 63, pp. 1344-1348.

12. Jordan H., Sanhueza A., Gautier V., Escobar B., Vargas T. Electrochemical study of the catalytic influence of *Sulfolobus metallicus* in the bioleaching of chalcopyrite at 70°C. *Hydrometallurgy*, 2006, vol.83 (1-4), pp. 55-62.

13. Meng C., Shi X., Lin H., Chen J., Guo Y. UV induced mutations in *Acidianus brierleyi* growing in a continuous stirred tank reactor generated a strain with improved bioleaching capabilities. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, vol. 40 (5), pp. 1136-1140.

14. Mikkelsen D., Kappler U., Webb R.I., Rasch R., McEwan A.G., Sly L.I. Visualisation of pyrite leaching by selected thermophilic archaea: Nature of microorganism–ore interactions during bioleaching. *Hydrometallurgy*, 2007, vol. 88 (1-4), pp. 143-153.

15. Rawlings D.E. Characteristics and adaptability of iron and sulfur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates. *Microbial Cell Factories*, 2005, vol. 4, no. 13, pp. 4 – 13.

16. Schippers A., Jozsa P.-G., Sand W. Sulfur chemistry in bacterial leaching of pyrite. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1996, vol. 62 (9), pp. 3424–3431

17. Xia J., Peng A., Hea H., Yanga Y., Liu X., Qiu G. A new strain *Acidithiobacillus albertensis* BY-05 for bioleaching of metal sulfides ores. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, vol. 17 (1), pp. 168-175.

Получено 22.03.2021

Об авторах

Пан Лариса Сергеевна (Пермь, Россия) – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и биотехнологии Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vvv@pstu.ru).

Бахирева Ольга Ивановна (Пермь, Россия) – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и биотехнологии Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vvv@pstu.ru).

Цыпкина Екатерина Алексеевна (Пермь, Россия) – студент бакалавриата Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Cypkinakaty@mail.ru).

About the authors

Larisa S. Pan (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemistry and biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: vvv@pstu.ru).

Olga I. Bakhireva (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Chemical Sciences, Associate Professor, Department of Chemistry and biotechnology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: vvv@pstu.ru).

Ekaterina A. Tsyapkina (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: Cypkinakaty@mail.ru).