Перспективы использования *Acidithiobacillus ferrooxidans* в биовыщелачивании металлов из отходов производства

Шаихова Д. Р.¹

¹ Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: darya.booo@mail.ru

Реферат

Введение. Снижение качества минерального сырья и проблемы экологической безопасности актуализируют развитие технологии биологического выщелачивания, где ключевым микроорганизмом является *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Методология. Анализ биотехнологий переработки бедного и труднообогатимого минерального сырья.

Биологическая характеристика *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Данный микроорганизм – грамотрицательный, хемоавтотрофный, ацидофильный аэроб, который растет при 1,0–4,5 pH и широком диапазоне температур. *A. ferrooxidans* является объектом многих исследований, так, недавно были открыты магнитосомы, а также полностью просеквенировано 8 штаммов. *A. ferrooxidans* использует Fe^{2+} и S^0 в качестве доноров электронов, а O^2 , S^0 или Fe^{3+} – в качестве акцепторов электронов.

Механизмы и технологии биовыщелачивания. Возможные механизмы биовыщелачивания сульфидных руд представляют собой большой интерес для исследования, так как на данный момент существуют три равносильные теории: контактный, бесконтактный и кооперативный механизмы. В промышленных масштабах различают кучное, подземное и чановое бактериальное выщелачивание.

Перспективные направления. На данный момент одно из перспективных направлений исследования – потенциальное применение *A. ferrooxidans* для переработки металлов из бытовых отходов. Также изучается устойчивость штаммов к тяжелым металлам, проблемы экологической безопасности при добыче и переработке минерального сырья и др. Также опубликованы методические рекомендации к проведению молекулярно-генетических исследований.

Область применения результатов. Применение биогеотехнологий позволит вовлечь в переработку бедное и труднообогатимое минеральное сырье, повысить эффективность извлечения полезных компонентов, а также обеспечить охрану окружающей среды.

Ключевые слова: биовыщелачивание; *Acidithiobacillus ferrooxidans*; микроорганизмы; гидрометаллургия; биотехнологии.

Введение. Проблема экологической безопасности при добыче и переработке полезных ископаемых является ключевой не только в России, но и во всем мире [1]. Снижение качества перерабатываемого промышленностью минерального сырья, а также образование большого количества отходов, размещенных в виде отвалов или хвостохранилищ, обуславливают развитие такой технологии, как биологическое выщелачивание. Использование микроорганизмов в извлечении металлов обеспечивает как охрану окружающей среды, так и эффективную добычу ценных элементов из упорных или бедных руд.

Известно, что ключевым микроорганизмом в процессе биовыщелачивания является *Acidithiobacillus ferrooxidans*, который обуславливает интенсивное окисление ионов двухвалентного железа в трехвалентное состояние.

Биологическая характеристика *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Acidithiobacillus ferrooxidans* (*A. ferrooxidans*) – грамотрицательный, хемоавтотрофный, ацидофильный аэроб [2], был впервые выделен Колмером и Хинклом в 1947 г. из дренажа кислых шахт [3].

Данный микроорганизм обычно растет в диапазоне $\text{pH} = 1,0\text{--}4,5$ (оптимум – 2,0) и в широком диапазоне температур – $10\text{--}47\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4]. Также к немаловажным факторам, влияющим на рост *A. ferrooxidans*, можно отнести концентрацию ионов Fe, восстановленной S и титр хлорида натрия [5]. Разница между оптимальными значениями pH для разных штаммов связана со специфической структурой и проницаемостью поверхности клеточной мембраны [6].

Недавно обнаруженные магнитные железосодержащие нанокристаллические магнетиты, которые связаны с мембраной клетки, – магнитосомы проиллюстрированы на рис. 1. Известно, что они синтезируются в *A. ferrooxidans* путем поглощения железа и являются источником слабого магнитотаксиса *A. ferrooxidans*, а также могут служить местами хранения и детоксикации железа [7].

Рис. 1. Электронная микрофотография *A. ferrooxidans*. Стрелками обозначены магнитосомы [8]

Fig. 1. Electron microscope photograph of *A. ferrooxidans*. Arrows indicate magnetosomes [8]

Несмотря на то что многие штаммы *A. ferrooxidans* имеют сходные фенотипические характеристики, существуют значительные различия в их ДНК и последовательностях генов 16S рРНК.

На данный момент получено более 500 изолятов *A. ferrooxidans*, и только восемь штаммов *A. ferrooxidans* были секвенированы с помощью полногеномного секвенирования [9].

A. ferrooxidans может использовать множество доноров электронов, включая Fe^{2+} , S^0 и восстановленные неорганические соединения серы, а также O_2 , S^0 или Fe^{3+} в качестве акцептора электронов [10].

Также известно, что *A. ferrooxidans* способен использовать электрический ток в качестве единственного источника энергии для дыхания [11]. Кроме того, *A. ferrooxidans* может получать энергию для роста посредством окисления молибдена и четырехвалентного урана [12, 13].

Данный микроорганизм использует CO_2 в качестве единственного источника углерода, процесс фиксации которого зависит от окисления Fe^{2+} , S и восстановленных соединений серы, так как благодаря этим процессам происходит получение энергии.

В процессе окисления Fe^{2+} большая часть электронов переносится на O_2 вдоль градиента потенциала, в то время как небольшое количество электронов переда-

ется обратно вдоль градиента потенциала. NAD(P)H, образующийся в последнем процессе, участвует в фиксации и аэробном метаболизме CO_2 [3].

Окисление серы связано с высоким окислительно-восстановительным потенциалом в цепи переноса электронов, что важно для фиксации CO_2 *A. ferrooxidans*. По сравнению с системой окисления Fe^{2+} процесс окисления серы является более сложным, и исследования по этой теме продвигаются достаточно медленно.

Таблица 1. Биовыщелачивание металлов из источников с помощью *A. ferrooxidans* [3]
Table 1. Bioleaching of metals with the help of *A. ferrooxidans* [3]

Источник	Штамм	Процент извлечения	pH	T, °C	Концентрация Fe(II), г/л
Джарлеит	LD-1	Cu 95,0 %	2,00	30	1,50
Борнит	LD-1	Cu 85,0 %	2,00	30	0
Комплексная Zn–Pb руда	—	Zn 51,0 %	1,50	33	7,00
Сфалерит	PTCC 1647	Zn 85,0 %	1,94	33,7	7,40
Хвосты	—	Mn 99,5 %; Zn 78,4 %; As > 60 %; Cu 31,5 %	2,50	30	9,00
Насыпной концентрат	SRDSM2	Zn 96,7 %; Cu 72,2 %	1,80	32	7,30
Медный флотационный концентрат	Tf-44	Ni 55,0 %; Co 64,0 %	2,30	30	7,30
Бедная урановая руда	—	U 49,0 %	2,00	30	9,00
Реальгар	BYQ-12	As 74,3 %	1,74	30	3,68
Тугоплавкая золотая руда	HGM 5	As 39,3 %	1,50	30	9,00

Механизмы и технологии биовыщелачивания. *A. ferrooxidans* считается важным представителем биовыщелачивающих бактерий, используемых для биохимического выщелачивания в кучах и биологического выщелачивания в чанах [14].

Возможные механизмы биовыщелачивания сульфидных руд представляют собой большой интерес для исследования, так как на данный момент существуют три равносильные теории: контактный, бесконтактный и кооперативный механизмы [15].

В ходе контактного механизма клетки *A. ferrooxidans* прикрепляются к поверхности сульфидных минералов, в результате чего образующиеся комплексные ионы Fe^{3+} начинают разлагать сульфид металла.

Бесконтактный механизм предполагает, что свободные ионы Fe^{3+} , окисленные планктонными клетками *A. ferrooxidans*, атакуют сульфиды металлов и восстанавливаются до ионов Fe^{2+} .

Кооперативное выщелачивание представляет собой растворение сульфида металла прикрепленными клетками *A. ferrooxidans* на поверхности минерала и планктонными бактериями, что по сути является комбинацией контактного и бесконтактного выщелачивания [15].

Несмотря на большое количество статей, посвященных фундаментальным аспектам, подавляющее большинство исследований направлено на изучение потенциала применения *A. ferrooxidans* в биовыщелачивании металлов.

Так было установлено, что *A. ferrooxidans* имеет потенциал при выщелачивании меди, цинка, никеля, урана, мышьяка и кобальта из низкосортных руд (табл. 1).

Установлено, что скорость выщелачивания металла связана со сродством между клетками *A. ferrooxidans* и минералами. *A. ferrooxidans* может извлекать 95, 85, 54 и 18 % меди из джарлеита, борнита, ковеллита и порфиринового халькопирита соответственно [16].

Извлечение меди и цинка *A. ferrooxidans* из полиметаллического концентрата было успешно достигнуто в системе периодической обработки [17, 18].

Таблица 2. Внедрение технологии биовыщелачивания в производство [23]
Table 2. Bioleaching technology introduction into production [23]

Месторождение	Тип	Содержание Cu, %	Производство, т/год
Duval (США)	Кучное	0,15–0,20	2,5
Bluebird (США)	Кучное	0,5	6,8
Kosaka (Япония)	Подземное	0,15–0,25	800,0
Rio Tinto (Испания)	Кучное	–	8,0
Cananea (Мексика)	Кучное/Подземное	–	9,0
St. Domingo (Португалия)	Подземное	–	670,0

Адаптированные *A. ferrooxidans* могут извлекать более 40,0 % никеля из пентландита и других сульфидов никеля с помощью системы биологического выщелачивания в кучах или чанах [19]. *A. ferrooxidans* может выщелачивать 98,0 и 96,8 % урана из испанской урановой руды и гранит-порфира соответственно [20, 21].

Исследования были проведены в лабораторных условиях – в колбах либо малообъемных ферментерах, в промышленных же масштабах различают кучное, подземное и чановое бактериальное выщелачивание.

Таблица 3. Биовыщелачивание из отходов с помощью *A. ferrooxidans* [3]
Table 3. Bioleaching from wastes with the help of *A. ferrooxidans* [3]

Отходы	Техника извлечения	Штамм	Процент извлечения
Печатная плата	Колба	Z1	Cu 92,6 %; Al 85,2 %; Zn 95,2 %
Печатная плата	Ферментер	JSTU-02	Cu 94,1 %
Батарея таблеточного типа	Колба	BCRC 13820	Ag 98,0 %
Использованные бытовые батареи	Колба	PTCC 1647	Ni 87,0 %; Cd 67,0 %; Co 93,7 %
Использованный электрический кабель	Ферментер	–	Cu > 90,0 %
Осадок сточных вод	Колба	PTCC 1646	Cd 71,9 %; Mn 92,5 %; Zn 89,1 %
Кек	Колба	PTCC 1626	Cr 55,6 %; Ni 58,2 %
Загрязненная ртутью почва	Колба	SUG 2-2	Hg 92,0 %
Пепел теплоэлектростанций	Колба	PTCC 1626	Cu 87 %; Ni 86,0 %; V 82,0 %

Кучному выщелачиванию обычно подвергают старые отвалы или вновь складуемые забалансовые руды, при подземном выщелачивании выщелачивающие растворы через скважины закачиваются в рудное тело и, пройдя через него, подаются на поверхность. Чановое бактериальное выщелачивание эффективно применяется при переработке труднообогатимых продуктов и концентратов, для их

очистки от вредных примесей, вскрытия тонковкрапленного золота и серебра, селективного извлечения металлов из сульфидных концентратов.

Кучное выщелачивание меди и урана широко применяется в США, странах Африки, Австралии, Испании, а также Чили [22]. В табл. 2 приведены примеры производств, использующих технологию биовыщелачивания. Кроме того, широкое распространение получила технология BIOX®, используемая для предварительной переработки упорных золотосодержащих руд.

На данный момент в эксплуатации находится 6 установок, одна из которых располагается на Николаевском месторождении (Казахстан), под орошением находится два отвала объемом до 2,7 млн т руды. В промышленных масштабах развивается биотехнологическая переработка золотомышьяковистых концентратов руд Олимпиадинского месторождения ЗАО «Полюс» [22].

Перспективные направления. На данный момент одно из перспективных направлений исследования – потенциальное применение *A. ferrooxidans* для переработки металлов с печатных плат, использованных элементов питания и кабелей, а также проведение ремедиационных мероприятий (табл. 3). Также изучается устойчивость штаммов к тяжелым металлам: А. С. Хомченко была выявлена устойчивость микроорганизмов к концентрациям солей Ni, Co, Cu, Mg, As в диапазоне 0,5–1,5 % [24].

Г. Г. Ягафарова с соавторами рассматривает проблемы экологической безопасности при добыче и переработке минерального сырья [1], Т. С. Хайнасовой (и др.) разработана технология по иммобилизации микроорганизмов [25]. Необходимо отметить, что были опубликованы методические рекомендации к проведению молекулярно-генетических исследований *A. ferrooxidans*, что может дать толчок к дальнейшим исследованиям в данной области [26].

Заключение. Таким образом, обзор исследований, посвященных *A. ferrooxidans*, свидетельствует о перспективности применения бактерий как в процессах переработки минерального сырья, так и в переработке бытовых отходов. Применение биогеотехнологий позволит вовлечь в переработку бедное и труднообогащаемое минеральное сырье, повысить эффективность извлечения полезных компонентов, а также обеспечить охрану окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ягафарова Г. Г., Кутлиахметов А. Н., Сафарова В. И., Кубарева С. Ю. Роль тионовых бактерий в выщелачивании металлов из породных отвалов на Учалинском горно-обогатительном комбинате // Георесурсы. 2012. № 6 (48). С. 84–87.
2. Yan L., Yin H. H., Zhang S. A., Leng F. F., Nan W. B., Li H. Y. Biosorption of inorganic and organic arsenic from aqueous solution by *Acidithiobacillus ferrooxidans* BY-3 // J. Hazard Mater. 2010. No. 178(1–3). P. 209–217.
3. Zhang S., Yan L., Xing W., Chen P., Zhang Y., Wang W. *Acidithiobacillus ferrooxidans* and its potential application // Extremophiles. 2018. No. 22. P. 563–580.
4. Valdés J. Pedrosio I., Quatrini R., Dodson R. J., Tettelin H., Blake R., Eisen J. A., Holmes D. S. *Acidithiobacillus ferrooxidans* metabolism: from genome sequence to industrial application // BMC Genom. 2008. No. 9(1). P. 597–620.
5. Hedrich S., Schlömann M., Johnson D. B. The iron-oxidizing proteobacteria // Microbiology. 2011. No. 157(6). P. 1551–1564.
6. Schrader J. A., Holmes D. S. Phenotypic switching of *Thiobacillus ferrooxidans* // J. Bacteriol. 1988. No. 170(9). P. 3915–3923.
7. Yan L., Zhang S., Chen P., Wang W., Wang Y., Li H. Magnetic properties of *Acidithiobacillus ferrooxidans* // Mater. Sci. Eng. 2013. No. 33(7). P. 4026–4031.
8. Yan L., Yue X., Zhang S., Chen P., Xu Z., Li Y., Li H. Biocompatibility evaluation of magnetosomes formed by *Acidithiobacillus ferrooxidans* // Mater. Sci. Eng. 2012. No. 32(7). P. 1802–1807.
9. Ulloa R., Moya-Beltrán A., Issotta F., Nuñez H., Covarrubias P. C., Donati E. R., Quatrini R., Giaveno A. Metagenome-derived draft genome sequence of *Acidithiobacillus ferrooxidans* RV1 from an abandoned gold tailing in Neuquén, Argentina // Solid State Phenom. 2017. No. 262. P. 339–442.
10. Osorio H., Mangold S., Denis Y., Nancucheo I., Esparza M., Johnson D. B., Bonnefoy V., Dopson M., Holmes D. S. Anaerobic sulfur metabolism coupled to dissimilatory iron reduction in the extremophile *Acidithiobacillus ferrooxidans* // Appl. Environ. Microbiol. 2013. No. 79(7). P. 2172–2181.

11. Ishii T., Kawaichi S., Nakagawa H., Hashimoto K., Nakamura R. From chemolithoautotrophs to electrolithoautotrophs: CO₂ fixation by Fe(II)-oxidizing bacteria coupled with direct uptake of electrons from solid electron sources // *Front Microbiol.* 2015. No. 6. P. 994–1003.
12. Sugio T., Hirayama K., Inagaki K., Tanaka H., Tano T. Molybdenum oxidation by *Thiobacillus ferrooxidans* // *Appl. Environ. Microbiol.* 1992. No. 58(5). P. 1768–1771.
13. Temple K. L., Colmer A. R. The autotrophic oxidation of iron by a new bacterium, *Thiobacillus ferrooxidans* // *J. Bacteriol.* 1951. No. 62(5). P. 605–611.
14. Brierley C. L. How will biomining be applied in future? // *T. Nonferr. Metal. Soc.* 2008. No. 18(6). P. 1302–1310.
15. Mahmoud A., Cézac P., Hoadley A. F. A., Contamine F., D'Hugues P. A review of sulfide minerals microbially assisted leaching in stirred tank reactors // *Int. Biodeterior Biodegrad.* 2017. No. 19. P. 118–146.
16. Dong Y., Lin H., Xu X., Zhou S. Bioleaching of different copper sulfides by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and its adsorption on minerals // *Hydrometallurgy.* 2013. No. 140. P. 42–47.
17. Tipe D. R., Dave S. R. Bioleaching process for Cu–Pb–Zn bulk concentrate at high pulp density // *Hydrometallurgy.* 2014. No. 75(1). P. 37–43.
18. Tipe D. R., Vora S. B., Dave S. R. Medium optimization for bioleaching of metals from Indian bulk polymetallic concentrate // *Indian J. Biotechnol.* 2004. No. 3. P. 86–91.
19. Watling H. R. The bioleaching of nickel-copper sulfides // *Hydrometallurgy.* 2008. No. 91(1–4). P. 70–88.
20. Muñoz J. A., Ballester A., González F., Blázquez M. L. A study of the bioleaching of a Spanish uranium ore. Part II: orbital shaker experiments // *Hydrometallurgy.* 1995. No. 38(1). P. 59–78.
21. Qiu G., Li Q., Yu R., Sun Z., Liu Y., Chen M., Yin H., Zhang Y., Liang Y., Xu L. Column bioleaching of uranium embedded in granite porphyry by a mesophilic acidophilic consortium // *Bioresour. Technol.* 2011. No. 102(7). P. 4697–4702.
22. Теляков Н. М., Дарьин А. А., Луганов В. А. Перспективы применения биотехнологий в металлургии и обогащении // *Записки Горного института.* 2016. Т. 217. С. 113–124.
23. Gentina J. C., Acevedo F. Microbial ore leaching in developing countries // *Trends in Biotechnology.* 1985. Vol. 3. No. 4. P. 86–89.
24. Хомченкова А. С. Исследование влияния различных концентраций солей тяжелых металлов на рост культуры ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов // *ГИАБ.* 2016. № S31. С. 217–222.
25. Хайнасова Т. С., Левенец О. О., Трухин Ю. П. Применение иммобилизации микроорганизмов в биовыщелачивании // *ГИАБ.* 2016. № S31. С. 235–246.
26. Рогатых С. В., Мурадов С. В. Методические рекомендации к проведению молекулярно-биологического анализа аборигенных микробных ассоциаций медно-никелевых месторождений // *ГИАБ.* 2016. № S31. С. 195–204.

Поступила в редакцию 7 мая 2019 года

Сведения об авторах:

Шаихова Дарья Рамильевна – младший научный сотрудник Института горного дела УрО РАН.
E-mail: darya.boov@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-90-97

Prospects for bioleaching of metal from wastes with *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Dariia R. Shaikhova¹

¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. The decline in the quality of mineral raw materials and the problems of ecological safety actualize the development of biological leaching technology, where *Acidithiobacillus ferrooxidans* is a key microorganism.

Methodology includes the analysis of the biotechnologies of low-grade and complex minerals processing. **Biological characteristics of *Acidithiobacillus ferrooxidans*.** This microorganism is a gram-negative, chemoautotrophic, acidophilic aerobic that grows at 1.0–4.5 pH and a wide range of temperatures. *A. ferrooxidans* is an object of many studies, so magnetosomes have recently been discovered, and 8 strains have been completely sequenced. *A. ferrooxidans* uses Fe²⁺ and S⁰ as electron donors, and O₂, S⁰ or Fe³⁺ as electron acceptors.

Mechanisms and technologies of bioleaching. Possible mechanisms for bioleaching of sulphide ores are of great interest for research, since at the moment there are three equivalent theories: contact, non-contact and cooperative mechanisms. Commercially there are heap, underground (in situ) and tank bacterial leaching.

Perspective directions. One of the promising areas of research is the potential use of *A. ferrooxidans* for the processing of metals from household waste. The resistance of strains to heavy metals, the problems

of environmental safety in the extraction and processing of mineral raw materials, etc. are also being studied. Guidelines for conducting molecular genetic studies were also published.

Conclusion. The use of biogeotechnologies will allow to engage low-grade and complex mineral resources in processing, to increase the effectiveness of useful components extraction, as well as to ensure environmental protection.

Key words: bioleaching; *Acidithiobacillus ferrooxidans*; microorganisms; hydrometallurgy; biotechnologies.

REFERENCES

1. Iagafarova G. G., Kutliakhmetov A. N., Safarova V. I., Kubareva S. Iu. The role of thionic bacteria (*acidithiobacillus ferrooxidans*) in metals leaching from rock dumps on Uchalinsky mining and processing integrated works. *Georesursy = Georesources*. 2012; 6 (48): 84–87. (In Russ.)
2. Yan L., Yin H. H., Zhang S. A., Leng F. F., Nan W. B., Li H. Y. Biosorption of inorganic and organic arsenic from aqueous solution by *Acidithiobacillus ferrooxidans* BY-3. *J. Hazard Mater.* 2010; 178(1–3): 209–217.
3. Zhang S., Yan L., Xing W., Chen P., Zhang Y., Wang W. *Acidithiobacillus ferrooxidans* and its potential application. *Extremophiles*. 2018; 22: 563–580.
4. Valdés J. Pedroso I., Quatrini R., Dodson R.J., Tettelin H., Blake R., Eisen J. A., Holmes D. S. *Acidithiobacillus ferrooxidans* metabolism: from genome sequence to industrial application. *BMC Genom.* 2008; 9(1): 597–620.
5. Hedrich S., Schlömann M., Johnson D. B. The iron-oxidizing proteobacteria. *Microbiology*. 2011; 157(6): 1551–1564.
6. Schrader J. A., Holmes D. S. Phenotypic switching of *Thiobacillus ferrooxidans*. *J. Bacteriol.* 1988; 170(9): 3915–3923.
7. Yan L., Zhang S., Chen P., Wang W., Wang Y., Li H. Magnetic properties of *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Mater. Sci. Eng.* 2013; 33(7): 4026–4031.
8. Yan L., Yue X., Zhang S., Chen P., Xu Z., Li Y., Li H. Biocompatibility evaluation of magnetosomes formed by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Mater. Sci. Eng.* 2012; 32(7): 1802–1807.
9. Ulloa R., Moya-Beltrán A., Issotta F., Nuñez H., Covarrubias P. C., Donati E. R., Quatrini R., Giaveno A. Metagenome-derived draft genome sequence of *Acidithiobacillus ferrooxidans* RV1 from an abandoned gold tailing in Neuquén, Argentina. *Solid State Phenom.* 2017; 262: 339–442.
10. Osorio H., Mangold S., Denis Y., Nancucheo I., Esparza M., Johnson D. B., Bonnefoy V., Dopson M., Holmes D. S. Anaerobic sulfur metabolism coupled to dissimilatory iron reduction in the extremophile *Acidithiobacillus ferrooxidans* // *Appl. Environ. Microbiol.* 2013; 79(7): 2172–2181.
11. Ishii T., Kawaichi S., Nakagawa H., Hashimoto K., Nakamura R. From chemolithoautotrophs to electrolithoautotrophs: CO₂ fixation by Fe(II)-oxidizing bacteria coupled with direct uptake of electrons from solid electron sources. *Front Microbiol.* 2015; 6: 994–1003.
12. Sugio T., Hirayama K., Inagaki K., Tanaka H., Tano T. Molybdenum oxidation by *Thiobacillus ferrooxidans*. *Appl. Environ. Microbiol.* 1992; 58(5): 1768–1771.
13. Temple K. L., Colmer A. R. The autotrophic oxidation of iron by a new bacterium, *Thiobacillus ferrooxidans*. *J. Bacteriol.* 1951; 62(5): 605–611.
14. Brierley C. L. How will biomining be applied in future? *T. Nonferr. Metal. Soc.* 2008; 18(6): 1302–1310.
15. Mahmoud A., Cézac P., Hoadley A. F. A., Contamine F., D'Hugues P. A review of sulfide minerals microbially assisted leaching in stirred tank reactors. *Int. Biodeterior Biodegrad.* 2017; 19: 118–146.
16. Dong Y., Lin H., Xu X., Zhou S. Bioleaching of different copper sulfides by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and its adsorption on minerals. *Hydrometallurgy*. 2013; 140: 42–47.
17. Tipre D. R., Dave S. R. Bioleaching process for Cu–Pb–Zn bulk concentrate at high pulp density. *Hydrometallurgy*. 2014; 75(1): 37–43.
18. Tipre D. R., Vora S. B., Dave S. R. Medium optimization for bioleaching of metals from Indian bulk polymetallic concentrate. *Indian J. Biotechnol.* 2004; 3: 86–91.
19. Watling H. R. The bioleaching of nickel-copper sulfides. *Hydrometallurgy*. 2008; 91(1–4): 70–88.
20. Muñoz J. A., Ballester A., González F., Blázquez M. L. A study of the bioleaching of a Spanish uranium ore. Part II: orbital shaker experiments. *Hydrometallurgy*. 1995; 38(1): 59–78.
21. Qiu G., Li Q., Yu R., Sun Z., Liu Y., Chen M., Yin H., Zhang Y., Liang Y., Xu L. Column bioleaching of uranium embedded in granite porphyry by a mesophilic acidophilic consortium. *Bioresour Technol.* 2011; 102(7): 4697–4702.
22. Teliakov N. M., Dariin A. A., Luganov V. A. Prospects of biotechnologies application in metallurgy and enrichment. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2016; 217: 113–124. (In Russ.)
23. Gentina J. C., Acevedo F. Microbial ore leaching in developing countries. *Trends in Biotechnology*. 1985; 3 (4): 86–89.
24. Khomchenkova A. S. Study of effects of various concentration salts of heavy metals on growth acidophilic chemolithotrophic microorganisms crop. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2016; S31: 217–222. (In Russ.)

25. Khainasova T. S., Levenets O. O., Trukhin Iu. P. The use of microorganisms immobilization in bioleaching. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2016; S31: 235–246. (In Russ.)
26. Rogatykh S. V., Muradov S. V. Guidelines for carrying out molecular biological analysis of native microbial associations copper-nickel deposits. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2016; S31: 195–204. (In Russ.)

Received 7 May 2019

Information about authors:

Dariia R. Shaikhova – junior researcher, Institute of Mining UB RAS. E-mail: darya.boo@mail.ru

Для цитирования: Шаихова Д. Р. Перспективы использования *Acidithiobacillus ferrooxidans* в биовыщелачивании металлов из отходов производства // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 6. С. 90–97. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-90-97

For citation: Shaikhova D. R. Prospects for bioleaching of metal from wastes with *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 6: 90–97 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-90-97