ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020;(12):25-32
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 66.061.34+579.66+550.72 DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-25-32

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ОКИСЛЕНИЕ СЕРЫ СМЕШАННОЙ КУЛЬТУРОЙ АЦИДОФИЛЬНЫХ ХЕМОЛИТОТРОФНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

А.В. Киореску

Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, e-mail: kioresku88@gmail.com

Аннотация: Во всем мире наблюдается истощение запасов богатой и легкообогатимой руды. По этой причине большое внимание начинает уделяется технологии бактериально-химического выщелачивания (БХВ), которая применима для переработки низкосортного минерального сырья: отвальных «хвостов», упорных руд с низком содержанием ценных компонентов. Данная технология имеет существенный недостаток, заключающийся в неспособности микроорганизмов создавать агрессивные условия для эффективного разложения минеральных комплексов, что негативно сказывается на продолжительности процессов. В работе представлены результаты эксперимента, цель которого заключалась в исследовании влияния периодического ультразвукового облучения различной длительности на процесс окисления серы и изменение количества свободноплавающих ацидофильных хемолитотрфоных микроорганизмов, которые используются в технологии БХВ. Ультразвуковое воздействие, в зависимости от длительности облучения культуры микроорганизмов в среде, способствовало изменению таких параметров, как численность микроорганизмов и pH среды. В ходе эксперимента количество активных планктонных форм бактерий увеличивалось в различной степени по сравнению с контрольным, в зависимости от продолжительности и режима облучения. Влияние облучения на процесс окисления серы было отмечено во всех экспериментальных группах и достигало максимального значения к концу эксперимента.

Ключевые слова: биовыщелачивание, сера, ацидофильные хемолитотрофные микроорганизмы, ультразвук, хвосты, упорные руды, pH, окисление, пассивирующий слой.

Для цитирования: *Киореску А. В.* Воздействие периодического ультразвукового облучения на окисление серы смешанной культурой ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 12. – С. 25–32. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-25-32.

Repeated ultrasonic radiation effects on sulfur oxidation with mixed culture of acidophilic chemolithotrophic microorganisms

A.V. Kioresku

Scientific Research Geotechnological Centre, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, e-mail: kioresku88@gmail.com

© А.В. Киореску. 2020.

Abstract: High-grade and easy ore resources are being dramatically depleted on a global scale by now. For this reason, it is expected to see an increasing interest in the combined biological-and-chemical leaching (BCL) applicable to processing of low-grade minerals: tailings, rebellious ore with low content of valuable components. An essential disadvantage of this technology consists in the inability of microorganisms to create an aggressive environment for efficient decomposition of mineral aggregates, which adversely affects duration of processing. This article describes the experiment aimed to study the influence of different-duration repeated ultrasonic radiation on sulfur oxidation efficiency and on the change in the number of free-floating acidophilic chemolithotrophic microorganisms used in BCL technologies. The ultrasonic treatment, subject to the radiation duration, favored the change in such parameters as the number of microorganisms and the medium pH. The number of active plankton bacteria increased in a different degree as compared with the reference quantity subject to duration and mode of radiation. The radiation effect on sulfur oxidation was observed in all test groups and reached maximum by the end of the experiment.

Key words: bioleaching, sulfur, acidophilic chemolithotrophic microorganisms, ultrasound, tailings, rebellious ore, pH, oxidation, passivation layer.

For citation: Kioresku A. V. Repeated ultrasonic radiation effects on sulfur oxidation with mixed culture of acidophilic chemolithotrophic microorganisms . *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(12):25-32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-25-32.

Введение

Важным направлением научно-технического прогресса в области переработки минерального сырья является использование процесса биовыщелачивания для переработки шлаков и шламов, отвальных «хвостов» и руд с низким содержанием ценных компонентов. Технология БХВ обеспечивает снижение стоимости конечного продукта благодаря низким капитальным затратам, а также способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду за счет высокой экологической безопасности технологии. Низкая скорость и интенсивность протекающих процессов значительно ограничивают применение методов БХВ в промышленности. В связи с этим изучение вопросов о механизмах влияния внешних физических факторов на микроорганизмы, участвующие в БХВ, является важным для решения прикладных задач биогеотехнологий [1].

В процессе БХВ сульфидных руд образуется элементная сера (S^0), которая способствует образованию пассивирующего слоя на поверхности минералов, при этом она инертна к абиотическому окислению и может удаляться в ходе биоокисления. Биоокисление серы и ее соединений — это необходимый компонент метаболизма многих ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов [2, 3].

В процессах БХВ низкий уровень pH среды (2 — 2,5) обусловлен биоокислением восстановленных неорганических соединений серы до сульфат-иона и необходим для нормальной жизнедеятельности ацидофильных микроорганизмов. Этапы дискретного метаболизма серы у тионовых бактерий соответствуют стабильным состояниям серы разного уровня восстановленности. Промежуточные продукты реакции, взаимодействуя с субстратом и продуктами обмена, образовывают множество различных соединений серы. Среди этих соединений наиболее значительны: сульфид, тиосульфат, сера, тетратионат, сульфат. Окисляясь, эти соединения опосредованно

через фермент цитохром-*c*-редуктазу, восстанавливают цитохром *c*, который окисляется кислородом. Эти реакции необходимы для протекания процессов окислительного фосфорилирования, при котором образуются молекулы АТФ — универсальный источник энергии для биохимических процессов [4–7].

Бактериальное окисление серы до сульфата энергетически более эффективно, чем окисление эквивалентного количества железа. Автотрофные бактерии, использующие в качестве источника энергии железо и/или серу, содержат неодинаковое количество цитохромов. Бактерия *At. ferooxidans*, окисляющая закисное железо, содержит значительно больше цитохромов, чем *At. ferooxidans*, окисляющая серу. Развиваясь на разных субстратах (Fe^{2+}, S^0 и др.) количество цитохромов в клетках *At. ferooxidans* изменяется, а именно: уменьшается на сере и увеличивается при развитии на железе [8].

В состав сульфидных минералов сера входит в виде S^{2-}. В процессе бактериального окисления таких минералов, под действием ферментов сульфидоксидазы и поли-сульфидоксидазы содержащаяся сера окисляется до элементной (1).

$$FeS_2 + Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 3FeSO_4 + 2S^0. \quad (1)$$

Элементная сера, образующаяся при бактериальном окислении арсенопирита, имеет кристаллическую структуру, отличную от структуры орторомбической серы. Такая сера была названа β-серой. Элементная β-сера также была обнаружена в некоторых горячих серных источниках, в которых присутствуют термофильные тионовые бактерии [9].

Сера откладывается на поверхности рудных частиц, где микроорганизмы окисляют ее до сульфат-иона. Упрощенно процесс бактериального окисления серы можно представить в виде последовательности (2).

$$S^{2-} \rightarrow S^0\beta \rightarrow SO_3^{2-} \rightarrow SO_4^{2-}. \quad (2)$$

Чтобы вступить в процессы ферментного окисления, элементная сера должна быть растворимой для липидов и фосфолипидов мембраны клетки. По этой причине при бактериальном окислении сульфидов образуется элементная сера β-модификации, обладающая высокой растворимостью в органических растворителях. Такая сера легко транспортируется в периплазматическое пространство клетки, где при участии ферментов окисляется на инвагинациях наружной стороны цитоплазматической мембраны [10].

В среде без бактерий частицы S^0 сохраняются в свободно плавающем состоянии до 3 месяцев, гидрофобные свойства поверхности частиц S^0 предотвращают смачивание водой. В среде, содержащей микроорганизмы *A. thiooxidans* частицы серы смачиваются жидкостью и погружаются на дно сосуда в течение 2 недель. Вещество, помогающее бактериям вовлекать в метаболизм S^0, имеет фосфолипидную природу [11, 12].

В основе технологий, использующих ультразвуковые волны, лежат эффекты взаимодействия ультразвука и среды. Ультразвуковые волны вызывают ряд специфических эффектов в жидких средах: кавитацию (образование пузырьков), интенсивные микро- и макропотоки, которые приводят к эффективному перемешиванию компонентов среды, образованию свободных радикалов, инициации ультразвуковых химических реакций [13, 14].

Механизм воздействия ультразвуковых волн на процессы БХВ в настоящее время малоизучен. Выражается совокупностью реакций и эффектов взаимодействия ультразвукового излучения с живыми объектами и средой, в которой они находятся [15–17].

Применение ультразвука для интенсификации бактериально-химического

выщелачивания металлов из сульфидных руд смешанной культурой хемолитотрофных микроорганизмов является одним из важных аспектов в решении задачи повышения эффективности процесса.

Цель исследования — изучение периодического воздействия ультразвука разной длительности на скорость роста железо- и сероокисляющих микроорганизмов и скорость окисления серы.

Материалы и методы исследования

Бактериальная культура

Смешанная культура хемолитотрофных микроорганизмов была выделена с образца сульфидной медно-никелевой руды месторождения Шануч (Камчатка). По данным ПЦР-диагностики, в бактериальное сообщество входили *At. ferrooxidans, At. thiooxidans, Sulfobacillus spp.* [18].

Накопление культуры микроорганизмов проходило в биореакторе при температуре 30 °С. Колбы располагались на качалке, скорость которой была равна 90 об/мин. Концентрация планктонных форм клеток в растворе достигала 107 кл/мл.

Перед началом процесса облучения 1 мл раствора, содержащего смешанную культуру хемолитотрофных микроорганизмов, был перенесен в колбы Эрленмейера (250 мл), которые содержали 100 мл питательной среды 9К без содержания железа. В качестве источника энергии была добавлена элементная сера (S^0) в количестве 10 г/л, размер частиц был меньше 100 мкм. Сера стерилизовалась текучим паром в течение 2 ч.

Процесс облучения УЗ

После посева микробной ассоциации в среду 9К, экспериментальные образцы были облучены различными способами:

- контроль — без облучения;
- 20III — троекратное двадцатиминутное облучение раз в 48 ч;
- 20V — пятикратное двадцатиминутное облучение раз в 24 ч;
- 40III — троекратное сорокаминутное облучение раз в 48 ч;
- 40V — пятикратное сорокаминутное облучение раз в 24 ч.

В качестве источника ультразвукового излучения использовалась ультразвуковая ванна Сапфир ТТЦ 28 (550 Вт, 35 кГц). Ультразвуковая ванна оснащена термостатом. На протяжении всего эксперимента отслеживалось показание температуры. Увеличение температуры среды не было зафиксировано. Размер внутренней камеры составлял 500×300×200 мм. Колбы Эрленмейера (250 мл), содержащие минеральную среду 9К и культуру микроорганизмов, помещали в емкость ультразвуковой ванны, которая была заполнена водой (20 л), и надежно фиксировали на все время облучения.

На протяжении всего эксперимента производили определение общего количества свободноплавающих микроорганизмов методом прямого подсчета под микроскопом. Окислительная активность оценивалась по скорости изменения pH среды и скорости образования сульфат-иона в растворе.

Результаты и их обсуждение

В ходе биоокисления S^0, которое длилось 15 суток, уровень кислотности изменился на 0,88 ед. pH в контрольной группе, на 1,27 ед. pH в 20III, на 1,33 ед. pH в 20V, на 1,51 ед. pH в 40III, на 1,43 ед. pH в 40V. Влияние режима и продолжительности УЗ облучения играет существенную роль в ускорении окислительного процесса. Образование сульфат-иона способствует снижению pH среды. Динамика процесса изменения pH и концентрации активных планк-

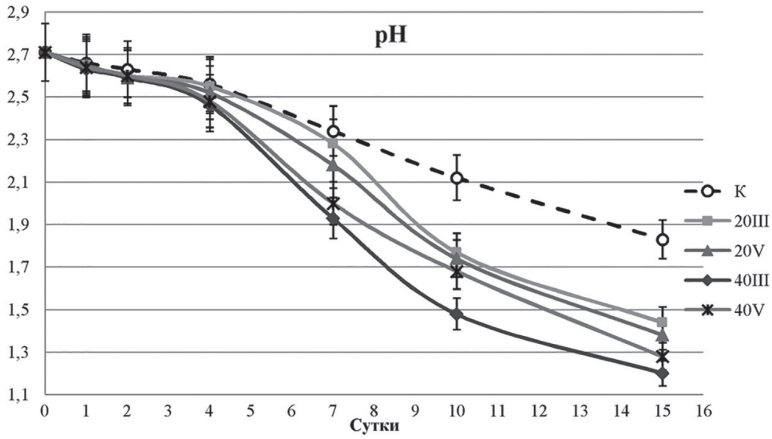

Рис. 1. Изменение уровня кислотности раствора (pH) во времени в процессе бактериально-химического окисления элементной серы

Fig. 1. Time change in acid intensity of solution (pH) during biological-and-chemical oxidation of elemental sulfur

тонных микроорганизмов в растворе представлена на рис. 1 и 2.

На рис. 2 представлен график изменения количества свободноплавающих микроорганизмов в растворе. Видно, что самая высокая скорость накопления биомассы наблюдалась в экспериментальной группе 40III, где максимальное количество клеток в миллилитре раствора было равно $6{,}3 \cdot 10^8$ и превосходило значение контрольной группы ($1{,}8 \cdot 10^8$ кл/мл) более чем в 3 раза. В образце 40V к концу эксперимента концентрация микроорганизмов превосходила таковую в контроле на 96,7% и была равна $3{,}6 \cdot 10^8$ кл/мл.

Облучение микроорганизмов в группах 20III и 20V так же стимулирует процессы роста. В группе 20V конечная концентрация микроорганизмов соста-

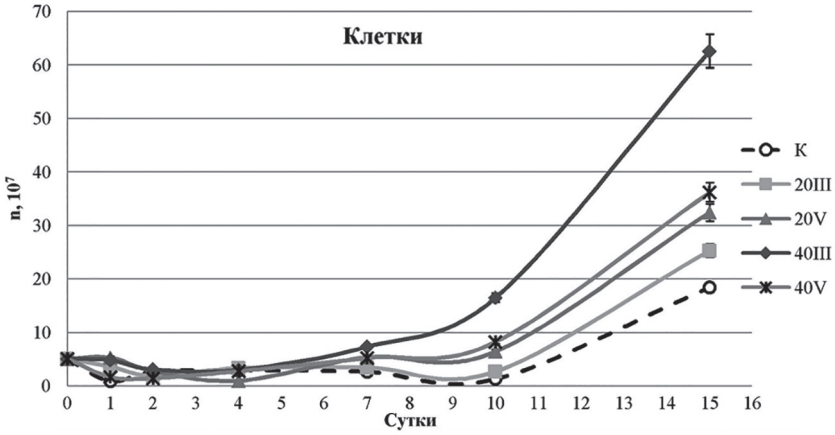

Рис. 2. Изменение концентрации свободноплавающих клеток в растворе в различных экспериментальных группах

Fig. 2. Change in concentration of free-floating cells in solution in different test groups

вила $3{,}2 \cdot 10^8$, что превосходит значение контрольной группы на 76,1%, в группе 20III наблюдалось менее выраженное увеличение на 37,5% ($2{,}5 \cdot 10^7$ кл/мл) относительно контроля.

Полученные данные дают основание предполагать, что в процессах биоокисления сульфидной руды в мезофильных условиях окисление S^0 будет происходить весьма затруднительно. Действие УЗ на экспериментальные образцы приводит к изменению значений измеряемых параметров. В данном случае можно говорить о влиянии ультразвукового излучения на эффективность окислительных процессов.

Изменение скорости окисления серы и изменение концентрации планктонных клеток после воздействия излучения выражены не одинаково у различных экспериментальных групп и не являются дозозависимыми эффектами. Если в группах 20III и 20V более выраженные положительные эффекты соответствуют большей суммарной длительности облучения, то в группах 40III и 40V регистрируется противоположная зависимость. По причине отсутствия прямой корреляции между суммарной длительностью облучения можно заключить, что действие ультразвука в данных условиях не сводится к физико-химическому взаимодействию со средой и опосредовано через биологическое влияние.

В заключение можно сказать, что ультразвуковые методы интенсификации являются перспективными для применения в биогеотехнологии. В зависимости от поставленной задачи ультразвуковое излучение позволяет активировать или ингибировать физико-химические и биохимические процессы, увеличивая процент извлечения ценного материала и уменьшая расход сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Киореску А. В.* Интенсификация бактериально-химического выщелачивания никеля, меди и кобальта из сульфидной руды с применением микроволнового излучения // Записки Горного института. — 2019. — Т. 239. — С. 528—535. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.528.

2. *Ghorbani Y., Franzidis J. P., Petersen J.* Heap leaching technology — current state, innovations, and future directions: a review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2016. Vol. 37. No 2. Pp. 73—119. DOI: 10.1080/08827508.2015.1115990.

3. *Shiers D. W.*, *Collinson D. M.*, *Watling H. R.* Life in heaps: a review of microbial responses to variable acidity in sulfide mineral bioleaching heaps for metal extraction // Research in Microbiology. 2016. Vol. 167. No 7. Pp. 576—586. DOI: 10.1016/j.resmic.2016.05.007.

4. *Emerson D.* The role of iron-oxidizing bacteria in biocorrosion: a review // Biofouling. 2018. Vol. 34. No 9. Pp. 989—1000. DOI: 10.1080/08927014.2018.1526281.

5. *Glombitza F., Kermer R., Reichel S.* Application potentials of geobiotechnology in mining, mineral processing, and metal recycling. 2019. DOI: 10.1002/ese3.542.

6. *Хайнасова Т. С.* Факторы, влияющие на бактериально-химические процессы переработки сульфидных руд // Записки Горного института. — 2019. — Т. 235. — С. 47—54. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.47.

7. *Хайнасова Т. С.*, *Левенец О. О.* Бактериально-химическое выщелачивание как экологически безопасный способ переработки сульфидной кобальт-медно-никелевой руды // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 1. — С. 49—54.

8. *Каравайко Г. И.*, *Кузнецов С. И.*, *Голомзик А. И.* Роль микроорганизмов в выщелачивании металлов из руд. — М.: Наука, 1972. — 248 с.

9. *Dunbar W. S.* Biotechnology and the mine of tomorrow // Trends in Biotechnology. 2017. Vol. 35. No 1. Pp. 79—89. DOI: 10.1016/j.tibtech.2016.07.004.

10. *Takeuchi T. L.*, *Suzuki I.* Cell hydrophobicity and sulfur adhesion of thiobacillus thiooxidans // Applied and Environmental Microbiology. 1997. Vol. 63. No 5. Pp. 2058 – 2061.

11. *Knickerbocker C., Nordstrom D. K., Southam G.* The role of «blebbing» in overcoming the hydrophobic barrier during biooxidation of elemental sulfur by Thiobacillus thiooxidans // Chemical Geology. 2000. Vol. 169. No 3 – 4. Pp. 425 – 433. DOI: 10.1016/S0009-2541(00)00221-7.

12. *Rojas-Chapana J. A., Giersig M., Tributsch H.* The path of sulfur during the bio-oxidation of pyrite by Thiobacillus ferrooxidans // Fuel. 1996. Vol. 75. No 8. Pp. 923 – 930. DOI: 10.1016/0016-2361(96)00057-9.

13. *Акопян В. Б.*, *Ершов Ю. А.* Основы взаимодействия ультразвука с биологическими объектами. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 224 с.

14. *Закиров Р. К.*, *Пронина Е. В., Ахмадуллина Ф. Ю., Победимский Д. Г.* Обогащение среды рост стимулирующими веществами при ультразвуковой обработке промышленных илов // Вестник Технологического университета. – 2009. – № 5. – С. 319 – 326.

15. *Vyas S.*, *Ting Y. P.* Effect of ultrasound on bioleaching of hydrodesulphurization spent catalyst // Environmental Technology & Innovation. 2019. Vol. 14. Article 100310. DOI: 10.1016/j.eti.2019.01.004.

16. *Wang H., Mustaffar A., Phan A., Zivkovic V., Reay D., Law R., Boodhoo K.* A review of process intensification applied to solids handling // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2017. Vol. 118. Pp. 78 – 107. DOI: 10.1016/j.cep.2017.04.007.

17. *Мусихин В. О.*, *Киореску А. В.* Сочетанное воздействие СВЧ-излучения и ультразвука на смешанную культуру хемолитотрофных аборигенных микроорганизмов Камчатской никеленосной провинции // Вестник ДВО РАН. – 2018. – № 6. – С. 159 – 165. DOI: 10.25808/08697698.2018.202.6.018.

18. *Рогатых С. В.*, *Докшукина А. А.*, *Левенец О. О.*, *Мурадов С. В.*, *Кофиади И. А.* Оценка качественного и количественного состава сообществ культивируемых ацидофильных микроорганизмов методами ПЦР-РВ и анализа библиотеки клонов // Микробиология. – 2013. – Т. 82. – № 2. – С. 212 – 212. DOI: 10.7868/S0026365613010138. РИНЦ

REFERENCES

1. Kioresku A. V. Intensification of bacterial-chemical leaching of nickel, copper and cobalt from sulfide ore using microwave radiation. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 239, pp. 528 – 535. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.528.

2. Ghorbani Y., Franzidis J. P., Petersen J. Heap leaching technology – current state, innovations, and future directions: a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016. Vol. 37. No 2. Pp. 73 – 119. DOI: 10.1080/08827508.2015.1115990.

3. Shiers D. W., Collinson D. M., Watling H. R. Life in heaps: a review of microbial responses to variable acidity in sulfide mineral bioleaching heaps for metal extraction. *Research in Microbiology*. 2016. Vol. 167. No 7. Pp. 576 – 586. DOI: 10.1016/j.resmic.2016.05.007.

4. Emerson D. The role of iron-oxidizing bacteria in biocorrosion: a review. *Biofouling*. 2018. Vol. 34. No 9. Pp. 989 – 1000. DOI: 10.1080/08927014.2018.1526281.

5. Glombitza F., Kermer R., Reichel S. *Application potentials of geobiotechnology in mining, mineral processing, and metal recycling*. 2019. DOI: 10.1002/ese3.542.

6. Khainasova T. S. Factors affecting the bacterial-chemical processes of processing sulfide ores. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 235, pp. 47 – 54. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.47.

7. Khainasova T. S., Levenets O. O. Bacterial-chemical leaching as an environmentally friendly method for processing sulfide cobalt-copper-nickel ore. *Prospect and protection of mineral resources*. 2015, no 1, pp. 49 – 54. [In Russ].

8. Karavayko G. I., Kuznetsov S. I., Golomzik A. I. *Rol' mikroorganizmov v vyshchelachivanii metallov iz rud* [The role of microorganisms in the leaching of metals from ores], Moscow, Nauka, 1972, 248 p.

9. Dunbar W. S. Biotechnology and the mine of tomorrow. *Trends in Biotechnology*. 2017. Vol. 35. No 1. Pp. 79—89. DOI: 10.1016/j.tibtech.2016.07.004.

10. Takeuchi T. L., Suzuki I. Cell hydrophobicity and sulfur adhesion of thiobacillus thiooxidans. *Applied and Environmental Microbiology*. 1997. Vol. 63. No 5. Pp. 2058—2061.

11. Knickerbocker C., Nordstrom D. K., Southam G. The role of «blebbing» in overcoming the hydrophobic barrier during biooxidation of elemental sulfur by Thiobacillus thiooxidans. *Chemical Geology*. 2000. Vol. 169. No 3—4. Pp. 425—433. DOI: 10.1016/S0009-2541(00)00221-7.

12. Rojas-Chapana J. A., Giersig M., Tributsch H. The path of sulfur during the bio-oxidation of pyrite by Thiobacillus ferrooxidans. *Fuel*. 1996. Vol. 75. No 8. Pp. 923—930. DOI: 10.1016/0016-2361(96)00057-9.

13. Akopyan V. B., Ershov Yu. A. *Osnovy vzaimodeystviya ul'trazvuka s biologicheskimi ob"ektami* [The basics of the interaction of ultrasound with biological objects], Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2005, 224 p.

14. Zakirov R. K., Pronina E. V., Akhmadullina F. Yu., Pobedimskiy D. G. Enrichment of the environment with growth of stimulating substances in the ultrasonic treatment of industrial sludge. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2009, no 5, pp. 319—326. [In Russ].

15. Vyas S., Ting Y. P. Effect of ultrasound on bioleaching of hydrodesulphurization spent catalyst. *Environmental Technology & Innovation*. 2019. Vol. 14. Article 100310. DOI: 10.1016/j.eti.2019.01.004.

16. Wang H., Mustaffar A., Phan A., Zivkovic V., Reay D., Law R., Boodhoo K. A review of process intensification applied to solids handling. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2017. Vol. 118. Pp. 78—107. DOI: 10.1016/j.cep.2017.04.007.

17. Musikhin V. O., Kioresku A. V. Combined effect of microwave radiation and ultrasound on a mixed culture of chemolithotrophic native microorganisms of the Kamchatka nickel-bearing province. *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk*. 2018, no 6, pp. 159—165. [In Russ]. DOI: 10.25808/08697698.2018.202.6.018

18. Rogatykh S. V., Dokshukina A. A., Levenets O. O., Muradov S. V., Kofiadi I. A. Assessment of the qualitative and quantitative composition of communities of cultured acidophilic microorganisms by real-time PCR and clone library analysis. *Microbiologia*. 2013, vol. 82, no 2, pp. 212—212. DOI: 10.7868/S0026365613010138. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Киореску Александр Вадимович — младший научный сотрудник,
Научно-исследовательский геотехнологический центр
Дальневосточного отделения РАН, e-mail: kioresku88@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

A.V. Kioresku, Junior Researcher,
Scientific Research Geotechnological Centre,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
683002, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia.

Получена редакцией 14.04.2020; получена после рецензии 21.09.2020; принята к печати 10.11.2020.
Received by the editors 14.04.2020; received after the review 21.09.2020; accepted for printing 10.11.2020.