

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ВОЗДЕЙСТВИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КУЛЬТУРУ ХЕМОЛИТОТРОФНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ

А.В. Киореску

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

Аннотация: В последние два десятилетия наблюдается устойчивое снижение мировых запасов легкообогатимых высококачественных руд с высоким содержанием ценных компонентов. В связи с этим растет коммерческий интерес к технологии бактериально-химического выщелачивания (БХВ), которая хорошо применима для извлечения металлов из бедных низкокачественных руд и хвостов обогащения. Данная технология имеет существенный недостаток, связанный с медленной кинетикой окислительно-восстановительных реакций идущих при участии хемолитотрофных микроорганизмов. Представлены результаты проведенного эксперимента, цель которого заключалась в выявлении оптимальных параметров СВЧ-обработки культуры хемолитотрофных микроорганизмов, обеспечивающих их максимальную окислительную активность и способность генерировать трехвалентное железо, которое является основным окислителем в процессах бактериально-химического выщелачивания. В качестве СВЧ излучения была использована микроволновая печь с частотой 2,45 ГГц. Плотность потока мощности равнялась 0,7 Вт/см². Результаты эксперимента показали, что при многократном воздействии СВЧ излучения на культуру хемолитотрофных микроорганизмов, продолжительностью 5 с, эффективность наработки ионов Fe³⁺ повышается на 27%, по сравнению с контролем. При увеличении времени экспозиции до 10 с был зарегистрирован обратный эффект: наблюдалось угнетение пролиферативной активности микроорганизмов и снижение их окислительной активности.

Ключевые слова: биовыщелачивание, микроволны, СВЧ, обогащение, интенсификация, хемолитотрофы.

Для цитирования: Киореску А. В. Влияние времени воздействия микроволнового излучения на культуру хемолитотрофных микроорганизмов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 9. – С. 115–121. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-115-121.

Effect of microwave radiation exposure time on chemolithotrophs

A.V. Kioresku

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

Abstract: The last two decades face a steady decline in the global reserves of free-milling high-grade ore with high content of valuable components. Incidentally, there is a rise in the commercial interest to the chemical; and bacterial leaching applicable to low-grade ore and tailings. This technology has a considerable deficiency connected with slow kinetics of redox reactions with participation of chemolithotrophs. This article presents the experimental results aimed to find optimal parameters

of microwave exposure of chemolithotrophs to maximize their oxidative activity and capacity to generate ferric iron being the main oxidizer in the chemical and bacterial leaching processes. The microwave exposure tests used a microwave oven with frequency of 2.45 GHz. The power flux density was 0.7 W/cm². The experimental results show that multiple microwave radiation exposure of chemolithotrophs for 5 s improves generation of Fe³⁺ ions by 27% as against the reference level. The increase in the exposure time up to 10 s has an inverse effect: proliferative capacity and oxidative activity of microorganisms decreases.

Key words: bioleaching, microwaves, microwave frequency, beneficiation, intensification, chemolithotrophs.

For citation: Kioresku A. V. Effect of microwave radiation exposure time on chemolithotrophs. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(9):115-121. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-115-121.

Введение

В течение более полувека горнодобывающая промышленность использовала технологию бактериально-химического выщелачивания (БХВ) для извлечения металлов из определенных сульфидных минералов. В последние несколько десятилетий коммерческий интерес к технологии вырос. Причиной этому является истощение месторождений богатых и легкообогатимых руд, что приводит к необходимости вовлечения в процесс переработки бедных и упорных труднообогатимых руд [1, 2].

Извлечение ценных компонентов из низкосортного минерального сырья с помощью традиционных пиро- и гидрометаллургических методов является экономически нецелесообразно, так как эти процессы требуют внушительных энергетических и капитальных затрат. Кроме того, пирометаллургические методы связаны с риском загрязнения окружающей среды вследствие выбросов в атмосферу продуктов обжига, которыми являются сернистый и угарный газ [3, 4].

В текущем сценарии БХВ является наиболее передовой и предпочтительной, экологически чистой технологией для переработки низкосортных, труднообогатимых руд. БХВ характеризуются низкими энергетическими и эксплуатационными затратами, а так же простотой оборудования [5].

Несмотря на все преимущества над традиционными методами переработки минерального сырья, БХВ имеет существенный недостаток, который заключается в медлительности окислительно-восстановительных реакций, протекающих с участием хемолитоавтотрофных микроорганизмов [6].

Существует несколько важных факторов, влияющих на эффективность растворения металлов в процессе биовыщелачивания. К таким факторам относятся: условия процесса (температура, Ph, состав питательной среды, плотность пульпы), свойства минералов, вид микроорганизмов [7].

Хемолитоавтотрофные микроорганизмы играют ключевую роль в извлечении ценных компонентов в ходе БХВ: они способствуют переходу металлов из нерастворимых соединений (сульфиды) в растворимые (сульфаты). В связи с этим поиск и разработка методов повышения способности бактерий к окислению субстрата и наработке окисляющих агентов, главными из которых являются ионы трехвалентного железа, является актуальной задачей на сегодняшний день [8–10].

Целью данной работы являлось определение оптимальных режимов облучения СВЧ-волнами культуры микроорганизмов, благоприятствующими их способности к наработке трехвалентного железа.

Материалы и методы

Бактериальная культура

В работе использовалась смешанная культура хемолитоавтотрофных микроорганизмов, выделенная из образца сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч (Камчатка). В состав данного сообщества по данным ПЦР-диагностики входили *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, *Sulfobacillus* sp. [11].

Процесс облучения

Облучение проводилось в СВЧ-печи, мощность которой 900 Вт, частота излучения 2,45 ГГц. Плотность потока мощности 0,7 Вт/см². В зависимости от режима облучения были сформированы четыре экспериментальные группы:

- СВЧ 5: разовое воздействие СВЧ (5 с) на суспензию клеток.
- СВЧ 10: разовое воздействие СВЧ (10 с) на суспензию клеток.
- СВЧ 5/1: воздействие СВЧ (5 с) раз в сутки;
- СВЧ 5/2: воздействие СВЧ (5 с) два раза в сутки;

В качестве контроля выступали образцы, которые не подвергались воздействию СВЧ-излучения. Выбор режимов и продолжительности облучения основывался на проведенных ранее экспериментах [12].

Оценка окислительной активности микроорганизмов в зависимости от выбранного режима СВЧ-облучения

Для оценки окислительной активности смешанной культуры хемолитоавтотрофных микроорганизмов было выбрано двухвалентное железо, которое является ключевым звеном в их электрон-транспортной цепи. Бактериальное окисление Fe(II) проходило в колбах Эрленмейера объемом 250 мл, содержащих стерильную минеральную среду Сильвермана-Людгрена (9К) с добавлением двухвалентного железа. Процесс шел при постоянной температуре 22 °С, без дополнительной

аэрации и перемешивания. Начальная концентрация микроорганизмов была равна 10⁷ мл⁻¹. На протяжении всего эксперимента производился подсчет клеток, измерялись параметры pH и Eh. Концентрация двух- и трехвалентного железа определялась методом визуального колориметрического титрования.

Результаты и их обсуждение

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что воздействие микроволнового излучения в течение 5 с способствует повышению скорости увеличения численности хемолитотрофных микроорганизмов (рис. 1).

В случае многократного воздействия эффект проявляется более выражено, чем при однократном облучении микробиологического инокулята. Так, в группе «СВЧ 5» максимальная концентрация клеток достигала $(3,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-7}$ в одном миллилитре раствора, а в группах «СВЧ 5/1» и «СВЧ 5/2» этот показатель был равен $(4,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-7}$ и $(4,7 \pm 0,5) \cdot 10^{-7}$ соответственно. В контрольных образцах, которые не подвергались воздействию СВЧ-излучения, количество клеток равнялось $(2,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-7}$ мл⁻¹. Также было зарегистрировано снижение скорости накопления биомассы после предварительного облучения суспензии клеток в течение 10 с. Причиной угнетения пролиферативной активности микроорганизмов, по всей видимости, являются клеточные повреждения, которые превышают возможности репаративных процессов. В экспериментальной группе «СВЧ 10» регистрировалась наименьшая концентрация планктонных форм микроорганизмов, которая была равна $(1,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-7}$ мл⁻¹.

На рис. 2 изображен график изменения концентрации трехвалентного железа в контрольной группе, а также в экспериментальных группах с лучшим и худшим результатом.

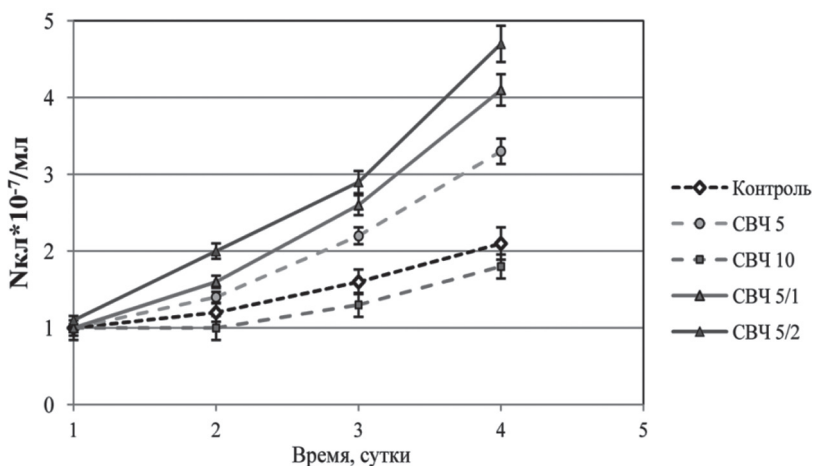


Рис. 1. Изменение численности свободноплавающих микроорганизмов: К — контроль, СВЧ 5 — предварительное разовое облучение инокулята в течение 5 с, СВЧ 10 — предварительное разовое облучение инокулята в течение 10 с, СВЧ 5/1 — облучение в течение 5 с один раз в сутки, СВЧ 5/2 — облучение в течение 5 с дважды в сутки

Fig. 1. Change in population level of free-flowing microorganisms: C—control; UHF 5—single pre-exposure of subculture for 5 s; UHF 10—single pre-exposure of subculture for 10 s; UHF 5/1—exposure for 5 s once a day; UHF 5/2—exposure for 5 s twice a day

Из графика видно, что в колбах, облучение которых происходило дважды в сутки, продолжительностью 5 с, наработка трехвалентного железа шла значительно эффективнее, чем в контроле. Причиной этому может служить большая

плотность биомассы в облученных образцах, а также повышенная окислительная активность этих микроорганизмов.

По всей видимости, биологический отклик на воздействие СВЧ-волн проявляется лишь в нескольких поколениях

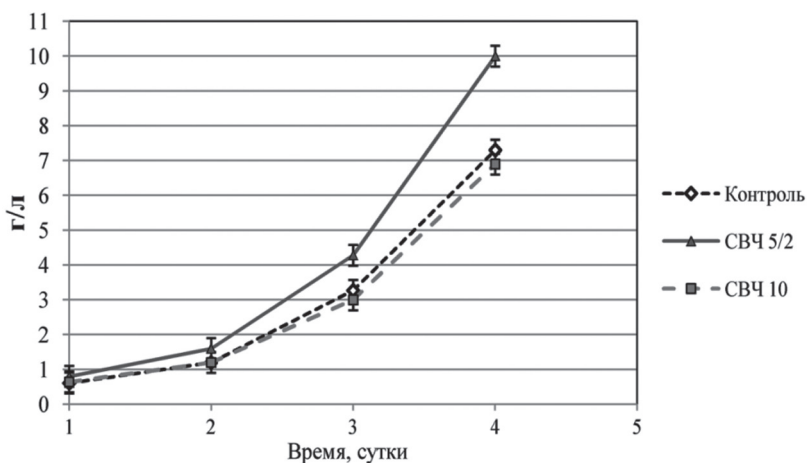


Рис. 2. Изменение концентрации трехвалентного железа в растворе: К — контроль, СВЧ 10 — предварительное разовое облучение инокулята в течение 10 с, СВЧ 5/2 — облучение в течение 5 с дважды в сутки

Fig. 2. Change in ferric iron concentration in solution: C—control; UHF 10—single pre-exposure of subculture for 10 s; UHF 5/2—exposure for 5 s twice a day

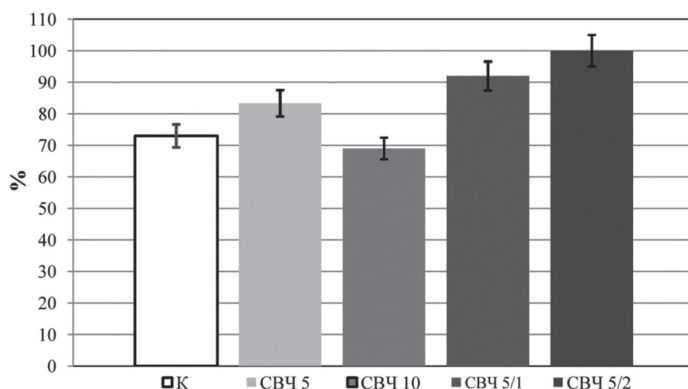


Рис. 3. Процентное содержание окисленного железа (II) в разных экспериментальных группах: К — контроль, СВЧ 5 — предварительное разовое облучение инокулята в течение 5 с, СВЧ 10 — предварительное разовое облучение инокулята в течение 10 с, СВЧ 5/1 — облучение в течение 5 с один раз в сутки, СВЧ 5/2 — облучение в течение 5 с дважды в сутки

Fig. 3. Percentage of oxidized iron (II) per test groups: C—control; UHF 5—single pre-exposure of subculture for 5 s; UHF 10—single pre-exposure of subculture for 10 s; UHF 5/1—exposure for 5 s once a day; UHF 5/2—exposure for 5 s twice a day

микроорганизмов, поэтому при многократном воздействии микроволнового излучения на бактериальную культуру стимулирующий эффект проявляется более выражено, чем при разовом облучении. К концу эксперимента в группе «СВЧ 5/2» было окислено 100 % двухвалентного железа, в то время как в контрольном образце лишь 73% (рис. 3). Наихудший результат зарегистрирован в опытах с микроорганизмами, предварительное облучение которых длилось 10 с. В этом случае было окислено 69% железа (II).

Заключение

Результаты эксперимента показали, что кратковременное воздействие микроволнового излучения на культуру бактерий, в зависимости от времени экспозиции, способно как стимулировать, так и угнетать рост и размножение хемолитотрофных микроорганизмов, а также их способность генерировать ионы трехвалентного железа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brierley C. L., Brierley J. A. Progress in bioleaching: part B: applications of microbial processes by the minerals industries // Applied microbiology and biotechnology. 2013. Vol. 97. No 17. Pp. 7543–7552.

Было выявлено, что предварительная разовая обработка суспензии клеток СВЧ-излучением (0,7 Вт/см²) продолжительностью 5 с способствует повышению бактериальной пролиферативной активности, а также улучшению показателей регенерации трехвалентного железа.

После десятисекундного облучения регистрировалось угнетение клеточного деления микроорганизмов и снижение их способности генерировать ионы Fe³⁺. Данный эффект можно связать со структурными повреждениями внутри клеток, которые превышают способности репаративных клеточных систем.

При регулярном пятисекундном (2 раза в сутки) воздействии СВЧ-излучения на бактериальную культуру, непосредственно в процессе окисления железа, стимулирующий эффект был более выраженным в сравнении с разовым предварительным облучением клеточного инокулята. В этих колбах окисление железа (II) шло на 27% эффективнее, чем в контрольных образцах.

2. Castro C., Donati E. Effects of different energy sources on cell adhesion and bioleaching of a chalcopyrite concentrate by extremophilic archaeon *Acidianus copahuensis* // *Hydrometallurgy*. 2016. Vol. 162. Pp. 49–56.

3. 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.

4. Мусихин В.О., Киореску А.В. Сочетанное воздействие СВЧ-излучения и ультразвука на смешанную культуру хемолитотрофных аборигенных микроорганизмов Камчатской никеленосной провинции // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. — 2018. — № 6. — С. 159–165.

5. Хайнасова Т.С. и др. Окисленная руда как источник выделения ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов для биовыщелачивания сульфидных медно-никелевых руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2013. — № 10. — С. 127–134.

6. Киореску А.В. Исследование влияния СВЧ-излучения на ацидофильные хемолитотрофные бактерии // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2016. — № S31. — С. 313–318.


7. Fu K. et al. Bioleaching of different copper sulphide minerals and their physicochemical properties dependence // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2016. Vol. 125. No 1. Pp. 1–4.

8. Mudd G. M., Weng Z., Jowitt S. M. A detailed assessment of global Cu resource trends and endowments // *Economic Geology*. 2013. Vol. 108. No 5. Pp. 1163–1183.

9. Fonti V., Dell'Anno A., Beolchini F. Does bioleaching represent a biotechnological strategy for remediation of contaminated sediments? // *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 563. Pp. 302–319.

10. Fang J. et al. Transformation of iron in pure culture process of extremely acidophilic microorganisms // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017. Vol. 27. No 5. Pp. 1150–1155.

11. 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.

12. Киореску А.В. Изменение окислительной активности хемолитотрофных микроорганизмов под воздействием микроволнового излучения // *Успехи современного естествознания*. — 2018. — № 11(2). — С. 343–347. 

REFERENCES

1. Brierley C.L., Brierley J.A. Progress in bioleaching: part B: applications of microbial processes by the minerals industries. *Applied microbiology and biotechnology*. 2013. Vol. 97. No 17. Pp. 7543–7552.

2. Castro C., Donati E. Effects of different energy sources on cell adhesion and bioleaching of a chalcopyrite concentrate by extremophilic archaeon *Acidianus copahuensis*. *Hydrometallurgy*. 2016. Vol. 162. Pp. 49–56.

3. Khaynasova T.S. Factors affecting the bacterial-chemical processes of sulphide ore processing. *Zapiski Gornogo instituta*. 2019. vol. 235, pp. 47–54. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.47. [In Russ].

4. Musikhin V.O., Kioresku A.V. The 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].

5. Khaynasova T.S. Oxidized ore as a source of selection of acidophilic chemolithotrophic microorganisms for bioleaching of sulfide copper-nickel ores. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2013, no 10, pp. 127–134. [In Russ].

6. Kioresku A.V. Investigation of the influence of microwave radiation on acidophilic chemolithotrophic bacteria. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no S31, pp. 313–318. [In Russ].

7. Fu K. et al. Bioleaching of different copper sulphide minerals and their physicochemical properties dependence. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2016. Vol. 125. No 1. Pp. 1–4.

8. Mudd G. M., Weng Z., Jowitt S. M. A detailed assessment of global Cu resource trends and enduses. *Economic Geology*. 2013. Vol. 108. No 5. Pp. 1163–1183.

9. Fonti V., Dell'Anno A., Beolchini F. Does bioleaching represent a biotechnological strategy for remediation of contaminated sediments?. *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 563. Pp. 302–319.

10. Fang J. et al. Transformation of iron in pure culture process of extremely acidophilic microorganisms. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2017. Vol. 27. No 5. Pp. 1150–1155.

11. Rogatykh S. V., Dokshukina A. A., Levenets O. O., Muradov S. V., Kofiadi I. A. Evaluation of the qualitative and quantitative composition of communities of cultivated acidophilic microorganisms by PCR-RT methods and analysis of the library of clones. *Mikrobiologiya*. 2013. vol. 82, no 2, pp. 212–212. [In Russ].

12. Kioresku A. V. Changes in the oxidative activity of chemolithotrophic microorganisms under the influence of microwave radiation. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2018, no 11(2), pp. 343–347. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

A. V. Kioresku, Graduate Student, Junior Researcher, e-mail: kioresku88@gmail.com,
Scientific Research Geotechnological Center,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДЗЕМНОЙ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ПРИ ОСВОЕНИИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (2019, СВ 13, 52 с.)

Приведены результаты исследований фигур выпуска при выемке угля с выпуском подкровельной толщи, описаны особенности развития фигур выпуска угля в длинном очистном забое. Представлены исследования термодинамического, гидродинамического и газодинамического режимов подземного генератора. Описаны основные принципы реализации раскройки запасов шахтных полей на выемочные единицы. Изложены основные принципы оценки горно-геологических условий при моделировании угольных пластов. Представлено обоснование технических и технологических факторов при отработке запасов крутых угольных пластов гидроимпульсными установками.

SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS OF UNDERGROUND AND PHYSICO-CHEMICAL GEOTECHNOLOGY IN THE DEVELOPMENT OF COAL DEPOSITS

The results of studies of the figures of release during extraction of coal with the release of roof strata, described the features of the development of the figures of production of coal in long breakage face. The research of thermodynamic, hydrodynamic and gas-dynamic modes of underground generator is presented. Describes the basic principles for the implementation of the cutting of the stocks of the mine fields at the excavation unit. The basic principles of evaluation of mining and geological conditions in the modeling of coal seams. Presents a study of the technical and technological factors when working out the reserves of steep coal seams hydro-impulse installations.