



УДК 66.061.34:579.66

Интенсификация бактериально-химического выщелачивания никеля, меди и кобальта из сульфидной руды с применением микроволнового излучения

А.В.КИОРЕСКУ

*Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, Россия*

В последние годы в России и за рубежом наблюдается устойчивая тенденция к истощению запасов богатой и легкообогатимой руды. В связи с этим все большее внимание уделяется технологии бактериально-химического выщелачивания (БХВ), которая в отличие от традиционных пирометаллургических методов обогащения хорошо применима для переработки низкосортного минерального сырья. Однако данная технология имеет существенный недостаток, который заключается в неспособности микроорганизмов создавать достаточно агрессивные условия для эффективной деструкции минеральных комплексов, что негативно сказывается на продолжительности процессов. В статье представлены результаты проведенного эксперимента, целью которого являлось исследование многократного кратковременного воздействия СВЧ-излучения на эффективность извлечения никеля, меди и кобальта в процессе бактериально-химического выщелачивания сульфидной руды. В качестве источника микроволнового излучения была использована СВЧ-печь мощностью 900 Вт и частотой излучения 2,45 ГГц. Облучение проводилось каждые сутки на протяжении всего эксперимента. Время экспозиции 5 и 10 с, плотность потока 0,7 Вт/см². Было установлено, что при всех исследуемых режимах СВЧ-облучения наблюдается существенное повышение эффективности накопления биомассы и окислительной способности среды по сравнению с контролем, не подвергнутому воздействию микроволнового излучения. Облучение в течение 5 с дважды в сутки повысило извлечение никеля на 16 %, кобальта на 15 % и меди на 6 %. Результаты проведенного исследования позволяют оценить перспективы применения новых методов биотехнологии в промышленной практике переработки рудного сырья с улучшением качественных показателей.

Ключевые слова: биовыщелачивание; микроволновое излучение; СВЧ-излучение; обогащение; интенсификация; хемолитотрофы

Как цитировать эту статью: 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

Введение. В настоящее время в России и в других странах наблюдается устойчивая тенденция к снижению запасов богатой и легкообогатимой руды. При этом спрос на металлы неуклонно растет. В связи с этим актуальным становится вовлечение в процесс переработки упорного труднообогатимого минерального сырья, а также хвостов с низким содержанием ценных компонентов [13].

Применение традиционных пирометаллургических методов переработки низкосортного сырья является экономически невыгодным. Кроме того, высокотемпературные процессы связаны с риском загрязнения окружающей среды отходами производства (CO, SO₂) [11].

В последние годы все большую популярность приобретает технология чанового бактериально-химического выщелачивания (БХВ) руд, которая является безотходной и экологически безопасной. Низкие капитальные затраты и техническая простота используемой аппаратуры позволяют резко снизить себестоимость переработки. Данная технология применима для переработки низкосортного минерального сырья [8].

В основе биовыщелачивания лежит процесс избирательного извлечения химических элементов из многокомпонентных соединений за счет их растворения микроорганизмами в водной среде. Выщелачивание осуществляют бактерии, которые относятся к роду *Thiohacillus*, а также археи рода *Sulfolobus*. Тиобациллы являются автотрофными видами, которые окисляют неорганические вещества (Fe²⁺, S⁰), высвободившаяся при этом энергия используется для усвоения углерода из CO₂. Распространенными видами микроорганизмов, которые используются в промышленности, являются *Acidithiobacillus caldus*, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus ferrivorans*, *Leptospirillum ferrooxidans* и *Acidithiobacillus thiooxidans* [6].



Растворение соединений металлов в результате бактериальной активности происходит за счет двух основных механизмов: прямого и косвенного. Прямой механизм – окисление субстрата за счет ферментативно-катализируемых реакций при адгезии бактерий на поверхности минерала. Под косвенным механизмом подразумевается химическое окисление минералов трехвалентным железом, которое продуцируется в реакциях биологического окисления ионов Fe^{2+} [3].

Несмотря на преимущества над традиционными методами обогащения, технология биовыщелачивания имеет существенный недостаток, который заключается в высокой продолжительности технологического процесса вследствие слабой кинетики окислительно-восстановительных реакций. В связи с этим актуальной задачей на сегодняшний день является поиск и разработка методов интенсификации бактериально-химического выщелачивания [12].

В научных работах одним из способов повышения бактериальной активности является использование волновых излучений, таких как ультразвук, микроволновое излучение, ионизирующее излучение. Эти излучения применяются и в сфере добычи и переработки минерального сырья [9, 16].

Цель данной работы – исследование многократного воздействия СВЧ-излучения на эффективность извлечения металлов в процессе бактериально-химического выщелачивания.

Долгое время считалось, что причиной биологического отклика на воздействие микроволнового излучения является локальный нагрев, вызванный трением полярных молекул, меняющих свою ориентацию в электромагнитном поле. Однако в последние годы было установлено, что биологический эффект проявляется при сверхмалых интенсивностях СВЧ-излучения, когда нагрев тканей не является определяющим или пренебрежимо мал. Такие эффекты получили названия «специфических» или нетепловых [1].

В технической литературе содержатся сведения об изменениях в структуре ДНК при воздействии микроволнового излучения. Нарушения ДНК, так называемые хромосомные аберрации, проявляются при экспрессии различных генов, что выражается в сбое продукции функциональных и структурных элементов клетки, которыми являются РНК и белки. Также известно, что первичной мишенью микроволнового излучения в живой клетке является биологическая мембрана, изменения в которой приводят к нарушению транспорта веществ между клеткой и окружающей средой [10].

Помимо биологической составляющей бактериально-химического выщелачивания микроволновое излучение вызывает изменения и в структуре руды. При воздействии СВЧ-излучения в руде происходит множество физико-химических и механических преобразований: образуются термомеханические напряжения, происходят релаксация остаточных напряжений с образованием микро- и макротрещин, полиморфные и фазовые превращения. Образование термически индуцированных микро- и макротрещин в руде вследствие воздействия СВЧ-волн создает дополнительный поверхностный фронт потенциальных мест прикрепления хемолитотрофных микроорганизмов и обеспечивает доступ выщелачивающего раствора к зернам минерала, улучшая тем самым извлечение целевых компонентов в процессе бактериально-химического выщелачивания [5].

В работе [9] показано улучшенное высвобождение сульфида меди, сульфида железа и природных золотосодержащих руд после микроволновой обработки и последующего измельчения.

В других исследованиях также продемонстрирована увеличенная эффективность восстановления металлов, обусловленная повышенным вскрытием зерен минералов вследствие индуцированного разрушения медных, свинцово-цинковых и никелевых сульфидных руд [14, 15].

Материалы и методы. Бактериальная культура. В эксперименте использовалась смешанная культура хемолитоавтотрофных микроорганизмов, выделенная из образца сульфидной медно-никелевой руды месторождения Шануч (Камчатка). По данным ПЦР-диагностики, в состав данного сообщества входили *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, *Sulfobacillus* sp. [7].

Руда. В качестве минерального сырья в работе была использована сульфидная руда кобальт-медно-никелевого месторождения Шануч с содержанием сульфидных минералов, равным 60-90 %, из которых 65-75 % составляет пирротин, 20-25 % – пентландит, 10 % – виоларит, 2-5 % – халькопирит. Исходные концентрации металлов, %: Ni – 7,68; Cu – 0,6; Co – 0,15. Для эксперимента образец руды был измельчен и просеян через сито, размер ячейки которого равнялся 100 мкм.

Процесс облучения. Облучение проводилось в бытовой СВЧ-печи мощностью 900 Вт. Частота излучения 2,45 ГГц. Плотность потока излучения $0,7 \text{ Вт/см}^2$. В зависимости от длительности экспозиции и частоты воздействия было сформировано три экспериментальные группы:

- 5-1 – воздействие СВЧ (5 с) раз в сутки;
- 5-2 – воздействие СВЧ (5 с) два раза в сутки;
- 10 – воздействие СВЧ (10 с) раз в сутки.

Контролем служили образцы, которые не подвергались воздействию микроволнового излучения. Выбор режимов облучения основывается на проведенных ранее экспериментах [2].

Наработка бактериальной культуры. Выделение и накопление необходимой для эксперимента биомассы осуществлялось в биореакторе, содержащем сульфидную полиметаллическую руду и питательную среду Сильвермана и Лундгрена ($T:Ж = 1:8$). Процесс происходил при постоянной температуре 30°C , с постоянным перемешиванием и принудительной аэрацией. Концентрация свободноплавающих микроорганизмов составляла 10^9 клеток в 1 мл раствора.

Оценка окислительной активности микроорганизмов в зависимости от выбранного режима СВЧ-облучения. Для оценки окислительной активности смешанной культуры хемоли-тотрофных организмов было выбрано двухвалентное железо, которое является ключевым звеном в их электрон-транспортной цепи.

Бактериальное окисление Fe^{2+} проходило в колбах Эрленмейера объемом 250 мл, содержащих стерильную минеральную среду Сильвермана – Лундгрена (9 К) с добавлением двухвалентного железа. Процесс шел при постоянной температуре 22°C без дополнительной аэрации и перемешивания. Начальная концентрация микроорганизмов 10^7 мл^{-1} . На протяжении всего эксперимента производился подсчет клеток, измерялись параметры pH и Eh. Концентрация двух- и трехвалентного железа определялась методом визуального колориметрического титрования.

Бактериально-химическое выщелачивание. Бактериально-химическое выщелачивание проходило в периодическом режиме в колбах Эрленмейера объемом 250 мл, содержащих 10 г кобальт-медно-никелевой руды и 100 мл среды Сильвермана и Лундгрена с добавлением железа (3 г/л). Колбы располагались на качалке (90 об/мин) в термостате при постоянной температуре 22°C . Начальное количество клеток равнялось 10^6 в 1 мл раствора.

На протяжении всего эксперимента ежедневно определялось количество свободноплавающих микроорганизмов методом прямого подсчета под микроскопом, определялась степень окисления двухвалентного железа методом визуального колориметрического титрования. Концентрация металлов (Ni, Cu, Co), перешедших в раствор, определялась методом атомно-адсорбционной спектроскопии на приборе 6300 Shimadzu в пламени ацетилен – воздух.

Результаты и их обсуждение. 1. *Оценка окислительной активности.* Анализ полученных результатов показал, что воздействие СВЧ-излучения приводит к значительному повышению количества планктонных форм микроорганизмов. На рис.1 представлен график изменения количества планктонных форм микроорганизмов в разных экспериментальных группах.

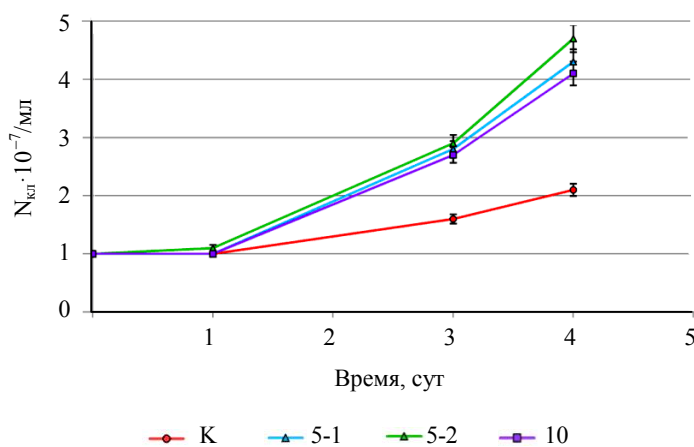


Рис.1. Изменение количества свободноплавающих клеток в 1 мл раствора в различных экспериментальных группах: K – контроль; 5-1 – воздействие СВЧ (5 с) раз в сутки; 5-2 – воздействие СВЧ (5 с) два раза в сутки; 10 – воздействие СВЧ (10 с) раз в сутки

количества планктонных форм микроорганизмов в разных экспериментальных группах.

В экспериментальной группе «5-2» была зарегистрирована наибольшая концентрация микроорганизмов в 1 мл раствора, которая равнялась $(4,7 \pm 0,2) \cdot 10^7$, что превосходит значения в контрольном образце более чем в 2 раза. Количество клеток в контрольном образце равнялось $(2,1 \pm 0,1) \cdot 10^7 \text{ мл}^{-1}$.

Количество микроорганизмов в 1 мл раствора в группах «5-1» и «10» равнялось $(4,1 \pm 0,2) \cdot 10^7$ и $(4,3 \pm 0,2) \cdot 10^7$ соответственно.

В ходе эксперимента было также установлено, что воздействие СВЧ-излучения способствует повышению железо-

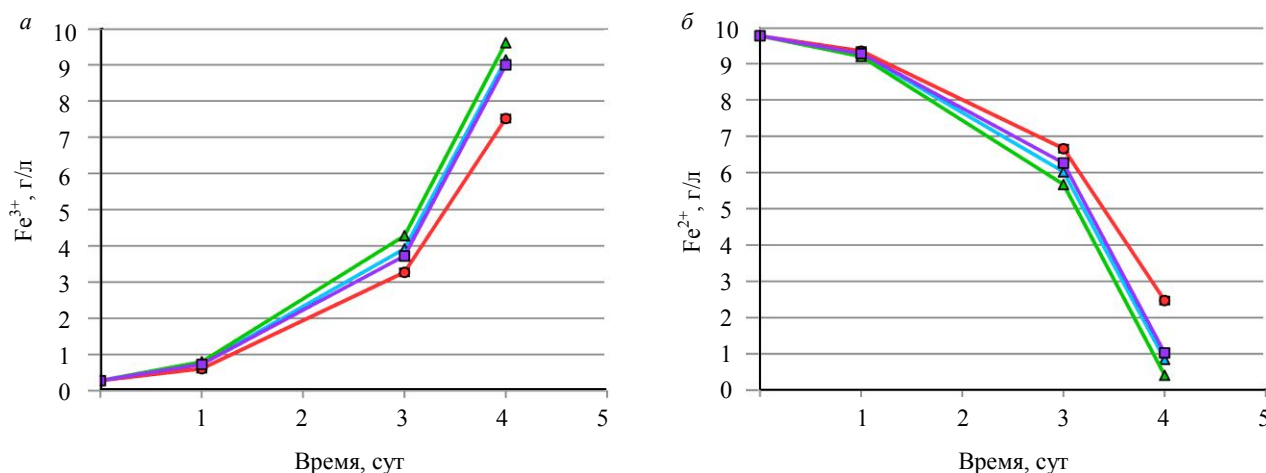


Рис.2. Изменение концентрации трехвалентного (а); и двухвалентного (б) железа
Условные обозначения см. на рис.1

окислительной активности хемолитотрофных микроорганизмов. Наиболее высокие показатели окисления железа были зарегистрированы в колбах «5-2», облучение которых происходило в течение 5 с дважды в сутки с интервалами в 12 ч. За время эксперимента в этой экспериментальной группе было окислено 96 % Fe^{2+} , в то время как в контроле лишь 81 %.

Воздействие микроволнового излучения продолжительностью 10 с один раз в сутки на протяжении всего эксперимента также способствовало повышению эффективности окисления двухвалентного железа микроорганизмами, но менее выражено, чем в группе «5-2»: к концу эксперимента было окислено 89 % Fe^{2+} , находившегося в колбах «10». По всей видимости, 10-секундное воздействие способствует возникновению повреждений в клетках микроорганизмов, превышающих возможности их репаративных процессов (рис.2).

2. Бактериально-химическое выщелачивание. Эксперимент по исследованию влияния различных режимов СВЧ-излучения на процессы бактериально-химического выщелачивания сульфидной руды длился 25 с. В ходе исследования было выявлено, что ежедневное воздействие микроволнового излучения способствует увеличению скорости накопления биомассы в колбах (рис.3).

Наилучшие показатели роста количества микроорганизмов наблюдались в экспериментальной группе «5-2», где максимальная концентрация свободно-плавающих клеток, которая регистрировалась к концу эксперимента, была равна $(1,2 \pm 0,1) \cdot 10^8$ кл/мл. В контрольной группе, которая не подвергалась воздействию микроволнового излучения, этот показатель достигал значения $(0,6 \pm 0,1) \cdot 10^8$ кл/мл, что в 2 раза ниже, чем в группе «5-2».

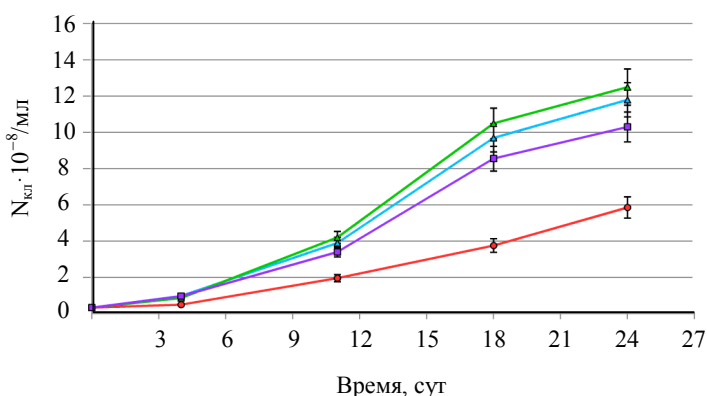


Рис.3. Изменение концентрации планктонных форм микроорганизмов в различных экспериментальных группах
Условные обозначения см. на рис.1

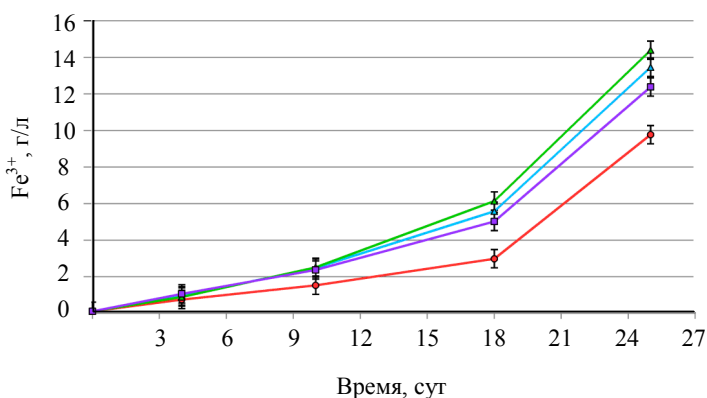


Рис.4. Изменение концентрации трехвалентного железа
Условные обозначения см. на рис.1

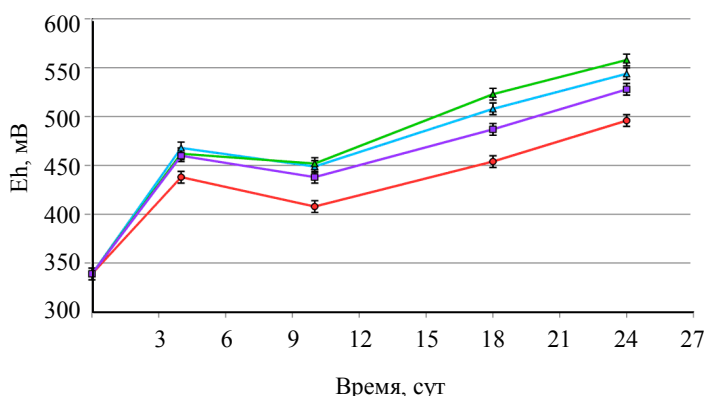
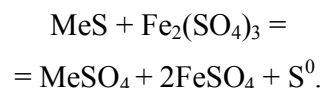


Рис.5. Изменение окислительно-восстановительного потенциала
Условные обозначения см. на рис.1

В группах «5-1» и «10» количество клеток в 1 мл раствора было равно $(1,1 \pm 0,1) \cdot 10^8$ и $(1,0 \pm 0,1) \cdot 10^8$ соответственно.

Оценка эффективности генерации Fe^{3+} хемолитотрофными микроорганизмами в процессе БХВ важна, так как ионы трехвалентного железа являются основным компонентом непрямого пути окисления сульфидной руды. Растворение металла можно описать следующим уравнением:



В ходе эксперимента было зарегистрировано существенное повышение концентрации трехвалентного железа в колбах, которые подвергались воздействию микроволнового излучения. Данный эффект может быть связан с лучшим, по сравнению с контролем, показателем увеличения количества микроорганизмов и с повышением их окислительной активности (рис.4).

Наибольшая концентрация трехвалентного железа на протяжении всего эксперимента регистрировалась в колбах экспериментальной группы «5-2», которые подвергались воздействию СВЧ-излучения продолжительностью 5 с дважды в сутки на протяжении всего эксперимента. Максимальная концентрация в этих колбах зафиксирована к концу эксперимента и была равна $14,0 \pm 0,5$ г/л. К этому же времени в колбах, которые не подвергались облучению, этот показатель равнялся $9,8 \pm 0,5$ г/л.

В группах «5-1» и «10» количество Fe^{3+} в 1 л раствора было равно $13,5 \pm 0,5$ и $12,4 \pm 0,5$ г соответственно.

Показатель Eh (редокс-потенциал) в колбах, которые подвергались ежесуточному воздействию микроволнового излучения, был существенно выше, чем в контрольных колбах (рис.5). В начале эксперимента во всех колбах $Eh = 339 \pm 5$ мВ. К концу эксперимента в группе «5-2» этот показатель вырос до 558 ± 5 мВ. В контрольных колбах значение Eh достигало лишь 496 ± 5 мВ и было наименьшим по сравнению с другими экспериментальными группами. В колбах, облучение которых составляло 10 с, показатель Eh был несколько ниже (528 ± 5 мВ), чем в группах «5-1» и «5-2», но существенно выше, чем в колбах, которые не подвергались облучению. Данные результаты соответствуют общей картине всего исследования.

Окислительно-восстановительный потенциал (Eh) является мерой интенсивности отдачи или присоединения электронов в окислительно-восстановительных реакциях, представленной электродвижущей силой, выражаемой в милливольтх. Высокий показатель Eh указывает на то, что данная система обладает высокой окислительной способностью.

На рис.6, а представлен график изменения концентрации никеля в жидкой фазе пульпы в контрольной группе, которая не подвергалась воздействию СВЧ-излучения, и экспериментальной группы «5-2», где показатели растворения никеля были самыми высокими среди всех остальных. На диаграмме (рис.6, б) показаны изменения концентрации никеля в растворе во всех экспериментальных группах, включая контроль, на различных этапах эксперимента. Видно, что эффективный переход никеля происходил во всех группах с 18 сут, что, скорее всего, связано со временем адаптации микроорганизмов к агрессивным условиям среды, которые представлены высокими концентрациями тяжелых металлов и высокочастотным микроволновым излучением. Наибольшая концентрация никеля, перешедшего в раствор, регистрировалась в колбах «5-2» и к концу эксперимента равнялась $6,0 \pm 0,4$ г/л. К этому же времени в контрольных колбах этот показатель был равен $5,1 \pm 0,4$ г/л. Максимальная концентрация растворенного никеля в экспериментальной группе «5-1» равнялась $5,7 \pm 0,5$ г/л, а в группе «10» – $5,6 \pm 0,5$ г/л соответственно.

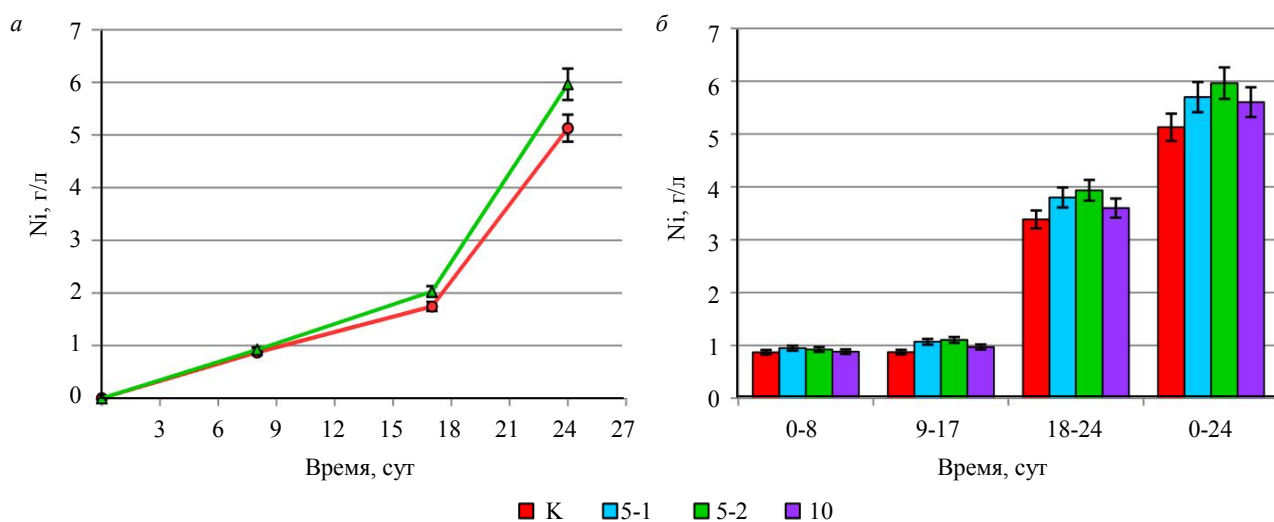


Рис.6. Изменение концентрации ионов никеля в жидкой фазе пульпы (а) и концентрации никеля в растворе (б) на различных этапах эксперимента

К – контроль; 5-1 – воздействие СВЧ (5 с) раз в сутки; 5-2 – воздействие СВЧ (5 с) 2 раза в сутки; 10 – воздействие СВЧ (10 с) раз в сутки

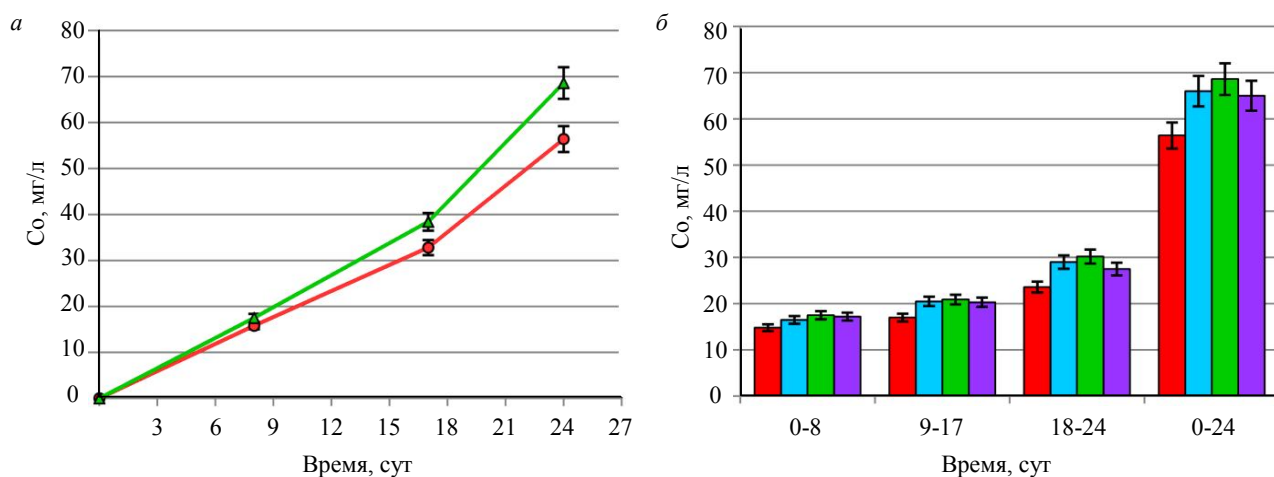


Рис.7. Изменение концентрации ионов кобальта в жидкой фазе пульпы (а) и концентрации кобальта в растворе (б) на различных этапах эксперимента

Условные обозначения см. на рис.6

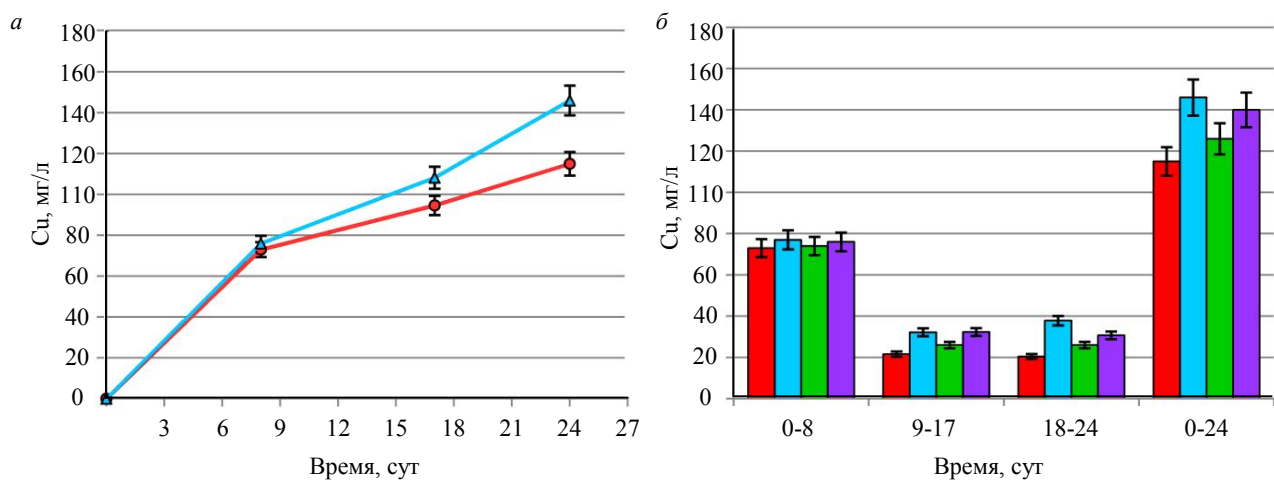


Рис.8. Изменение концентрации ионов меди в жидкой фазе пульпы (а) и концентрации меди в растворе (б) на различных этапах эксперимента

Условные обозначения см. на рис.6



Электрохимические свойства никеля и кобальта близки, поэтому общая картина выщелачивания этих металлов схожа (рис.7). Как и в случае с никелем, лучшие показатели перехода кобальта в раствор наблюдались в группе «5-2», где к концу эксперимента концентрация данного металла в жидкой фазе составляла $68,6 \pm 4,8$ мг/л. В контроле этот показатель был равен $56,4 \pm 3,9$ мг/л. В группе «10» концентрация кобальта в растворе ($65 \pm 4,5$ мг/л) была выше, чем в контроле, но ниже, чем в группах «5-1» и «5-2».

Картина извлечения меди (рис.8) в отличие от никеля и кобальта несколько иная. Здесь наибольшая концентрация меди в растворе на протяжении всего эксперимента наблюдалась в экспериментальной группе «5-1», где к концу эксперимента она была равна $145,9 \pm 10,2$ мг/л. В контрольных колбах этот показатель равнялся $115,1 \pm 8,3$ мг/л. В группе «10» концентрация меди, извлеченной из руды, к концу эксперимента была равна $140,0 \pm 9,5$ г/л, а в «5-2» – $122,0 \pm 8,5$ мг/л.

Извлечение металла вычислялось как отношение количества этого элемента в жидкой фазе пульпы к общей массе элемента во всей пробе по формуле

$$X = \frac{m(\text{Me})_{\text{р-р}}}{m(\text{Me})_{\text{проб}}} 100,$$

где X – процент извлечения металла из руды; $m(\text{Me})_{\text{р-р}}$ – масса металла в растворе; $m(\text{Me})_{\text{проб}}$ – суммарная масса металла в жидкой и твердой фазах пульпы.

Процент извлечения металлов

Шифр группы	Извлечение, %		
	Ni	Co	Cu
К	60	31	14
5-1	72	42	20
5-2	76	46	17
10	69	40	18

Результаты вычисления (см. таблицу) показали, что в контрольном образце извлечение никеля составило 60 %, в группе «5-1» – 72 %, в группе «5-2» – 76 %, в группе «10» – 69 %. Наилучший показатель извлечения кобальта также был в группе «5-2» (46 %), что на 15 % больше, чем в контроле. Несколько иная ситуация с извлечением меди: максимальный процент извлечения зарегистрирован в группе «5-1» (20 %), в контроле 14 %.

Таким образом, в ходе проведенного эксперимента было установлено, что многократное кратковременное воздействие СВЧ-излучения на компоненты бактериально-химического выщелачивания способствует улучшению показателей извлечения металлов из сульфидной руды.

Видимо, причиной этому является повышенная скорость прироста количества хемолитотрофных микроорганизмов, а также образование индуцированных СВЧ-излучением дефектов в структуре руды, создающих дополнительный поверхностный фронт потенциальных мест прикрепления микроорганизмов и обеспечивающих доступ выщелачивающего раствора к зернам минерала, улучшая тем самым извлечение целевых компонентов.

Выводы

1. Многократное краткосрочное воздействие СВЧ-излучения способствует увеличению скорости накопления биомассы хемолитотрофных микроорганизмов и повышению их окислительной активности.

2. Многократное воздействие микроволнового излучения ($0,7$ Вт/см²) продолжительностью 5 с позволяет добиться увеличения показателей извлечения никеля на 16 %, кобальта на 15 %, меди на 6 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бецкий О.В. Миллиметровые волны и живые системы / О.В.Бецкий, Н.Н.Лебедева // Наука в России. 2005. № 6. С. 13-19.
2. Киореску А.В. Влияние продолжительности предварительного облучения СВЧ-волнами культуры хемолитотрофных микроорганизмов на эффективность процессов биовыщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № S32. С. 237-247.
3. Киореску А.В. Изменение окислительной активности хемолитотрофных микроорганизмов под воздействием микроволнового излучения // Успехи современного естествознания. 2018. № 11(2). С. 343-347.



4. Киореску А.В. Исследование влияния СВЧ-излучения на ацидофильные хемолитотрофные бактерии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № S31. С. 86-191.
5. Киореску А.В. Механизмы воздействия микроволнового излучения на процессы выщелачивания минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 63. С. 335-340.
6. Кузякина Т.И. Биотехнология извлечения металлов из сульфидных руд / Т.И.Кузякина, Т.С.Хайнасова, О.О.Левенец // Вестник Камчатской региональной организации. Серия: Науки о Земле. 2008. № 12. С. 76-86.
7. Оценка качественного и количественного состава сообществ культивируемых ацидофильных микроорганизмов методами ПЦР-РВ и анализа библиотеки клонов / С.В.Рогатых, А.А.Докшукина, О.О.Левенец, С.В.Мурадов, И.А.Кофиади // Микробиология. 2013. Т. 82. № 2. С. 212-212.
8. 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
9. Amankwah R.K. Microwave heating of gold ores for enhanced grindability and cyanide amenability / R.K.Amankwah, G.Ofori-Sarpon // Minerals Engineering. 2011. Vol. 24. № 6. P. 541-544.
10. Feasibility for microwaves energy to affect biological systems via nonthermal mechanisms: a systematic approach / F.Apollonio, M.Liberti, A.Paffi, C.Merla, P.Marracino, A.Denzi // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 2013. Vol. 61. № 5. P. 2031-2045.
11. Johnson D.B. Development and application of biotechnologies in the metal mining industry // Environmental Science and Pollution Research International. 2013. Vol. 20. № 11. P. 7768-7776.
12. Litvinenko V. Preface. Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – XI Russian-German Raw Materials Conference. Potsdam, Germany, 7-8 November 2018. London: Taylor and Francis Group, 2019. P. 9-11.
13. Mudd G.M. A detailed assessment of global Cu resource trends and endowments / G.M.Mudd, Z.Weng, S.M.Jowitt // Economic Geology. 2013. Vol. 108. № 5. P. 1163-1183.
14. Orumwense O.A. Effect of microwave pretreatment on the liberation characteristics of a massive sulfide ore / O.A.Orumwense, T.Negeri, R.Lastra // Mining, Metallurgy & Exploration. 2004. Vol. 21. № 2. P. 77-85.
15. Vorster W. The effect of microwave radiation upon the processing of Neves Corvo copper ore / W.Vorster, N.A.Rowson, S.W.Kingman // International journal of mineral processing. 2001. Vol. 63. № 1. P. 29-44.
16. Xia L. Comparison of three induced mutation methods for Acidithiobacillus caldus in processing sphalerite // Minerals Engineering. 2007. Vol. 20. № 14. P. 1323-1326.

Автор А.В.Киореску, младший научный сотрудник, kioresku88@gmail.com (Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия).

Статья поступила в редакцию 14.09.2019.

Статья принята к публикации 26.05.2019.