

УДК 66.061.34+579.66

БИОВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩЕГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА ХЕМОЛИТОТРОФНЫМИ МИКРООРГАНИЗМАМИ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

© 2025 г. Н. В. Фомченко¹, Г. В. Новиков¹, В. С. Меламуд¹, М. И. Муравьев^{1,*}

¹Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, Федеральный исследовательский центр
“Фундаментальные основы биотехнологии” Российской академии наук, Москва, 119071 Россия

*e-mail: maxmuravyov@inmi.ru

Поступила в редакцию 23.06.2025 г.

После доработки 03.07.2025 г.

Подписано к публикации 05.07.2025 г.

Исследован процесс биовыщелачивания металлургического шлака, содержащего никель и медь, при 40, 45 и 50°C. В экспериментах использованы микробные сообщества, росшие при 40 и 45°C, которые включали бактерии *Leptospirillum ferriphilum* и *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*. Микробное сообщество, которое культивировали при 50°C, включало представителей *S. thermosulfidooxidans* и *Acidiplasma* sp. Показано, что растворение твердой фазы, окисление двухвалентного железа микроорганизмами были наибольшими при 45°C. При этом основное количество меди (95.5–100%) и никеля (92.3–100%) переходило в раствор в первые сутки биовыщелачивания. Исследование кинетики химического выщелачивания цветных металлов за 4 ч показало, что в присутствии 5 г/л Fe³⁺ извлечение никеля и меди составило 93.0 и 94.3% соответственно, в то время как в отсутствие Fe³⁺ в раствор переходило 75.0% никеля и 77.8% меди.

Ключевые слова: биогидрометаллургия, никелевый шлак, металлургический отход, биовыщелачивание, ацидофильные микроорганизмы

DOI: 10.7868/S3034574X25060048

Производство никеля в 2023 г. достигло 3.4 млн т, при этом на Россию приходилось 0.2 млн т [1]. Большая часть этого количества используется при производстве легированных сталей (65% потребления), батарей, в том числе для электроавтомобилей (16%), в гальваническом производстве и производстве сплавов и др. [1]. В настоящее время в мире растет производство никеля из латеритовых руд (70%), однако получение этого металла из сульфидных руд все еще занимает значительное место (20%) при том, что в первых рудах сосредоточены запасы 55% никеля, а во вторых – 28% [2]. Переработка сульфидных никелевых руд связана с использованием в первую очередь пирометаллургических процессов – плавки, обжига [3]. Отходами этих процессов являются металлургические шлаки, в которые переходит силикатная составляющая. Несмотря на совершенствование технологий пирометаллургии и обогащения руд, шлаки содержат остаточные количества целе-

вых металлов, что не только связано со снижением экономической эффективности горно-металлургической переработки руд, но и представляет собой экологическую угрозу вследствие выделения тяжелых металлов в окружающую среду при хранении отходов [4, 5]. Отсутствие технологии, обеспечивающей высокое комплексное извлечение из шлаков цветных металлов, вынуждает накапливать шлаки в растущих отвалах, выводя из землепользования большие территории. Вместе с тем состав металлургических шлаков позволяет его использовать в различных отраслях, в том числе строительной и керамической, ограничением чего является наличие в их составе цветных металлов [6–8]. Таким образом, извлечение цветных металлов из металлургических шлаков не только позволит повысить комплексность и полноту использования минерального сырья, увеличит производство целевых металлов, но и позволит полностью утилизировать твердый отход металлургического производства,

устранив тем самым потенциальный источник угроз окружающей среде [9].

Ряд гидрометаллургических методов извлечения металлов из металлургических шлаков продолжает изучаться [10], однако наиболее привлекательным с точки зрения охраны окружающей среды и снижения негативных последствий производств является биотехнологический способ, основанный на использовании ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов [11, 12].

Использование микроорганизмов для выщелачивания металлов, прежде всего, связано с сульфидным сырьем [13, 14] и имеет множество примеров промышленного внедрения преимущественно для переработки золотосодержащего сырья [15, 16]. Однако состав металлургических шлаков позволяет рассматривать их как потенциальную цель биогидрометаллургии.

Несмотря на то, что использование выщелачивания металлов из металлургических шлаков с применением микроорганизмов было исследовано в нескольких работах, они посвящены преимущественно медным и свинцово-цинковым шлакам [17–20], в то время как исследования по извлечению металлов из шлаков пирометаллургической переработки медно-никелевых руд ограничены [21], в связи с чем, представляет интерес изучение поведения металлов при биовыщелачивании медно-никелевых шлаков.

Цель работы – исследование биовыщелачивания металлов из металлургического шлака, содержащего никель и медь, с использованием сообществ ацидофильных железоокисляющих микроорганизмов при различной температуре.

МЕТОДИКА

Характеристика шлака. В работе использован старогодний металлургический шлак переработки медно-никелевых сульфидных руд Норильской рудной зоны. Химический состав шлака, использованного в работе (%): никель – 2.66, медь – 2.12, железо – 16.7, сера – 1.88, кремний – 17.1, кальций – 4.5, алюминий – 4.8, магний – 2.3. Минералогические исследования с использованием порошковой дифрактометрии (рис. 1) и микроскопии (рис. 2) позволили установить, что проба шлака состоит из двух фракций в равных долях. Первая представлена крупными каплевидными и остроугольными обломками черного непрозрачного магнитного силикатного стекла, дифрактограмма которой соответствовала фаялиту (Fe_2SiO_4). В этой фракции присутствовало также аморфное стекло, содержался никель в составе силикатов, а также имелись включения металлической меди и сульфидов меди (ковеллина, халькопирита и борнита). Вторая фракция представляла собой пылевидный материал, состоящий из кварца (SiO_2), плагиоклаза ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и серпентина ($(\text{Mg, Fe, Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$).

Культуры микроорганизмов. Для опытов были созданы три сообщества ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов: сообщества, росшие при 40 и 45°C, включали бактерии *Leptospirillum ferriphilum* и *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*. Микробное сообщество, которое культивировали при 50°C, включало представителей *S. thermosulfidooxidans* и *Acidiplasma* sp. Культуры микроорганизмов для создания сообществ были получены из коллекции лаборатории хемолитотрофных микроорганизмов

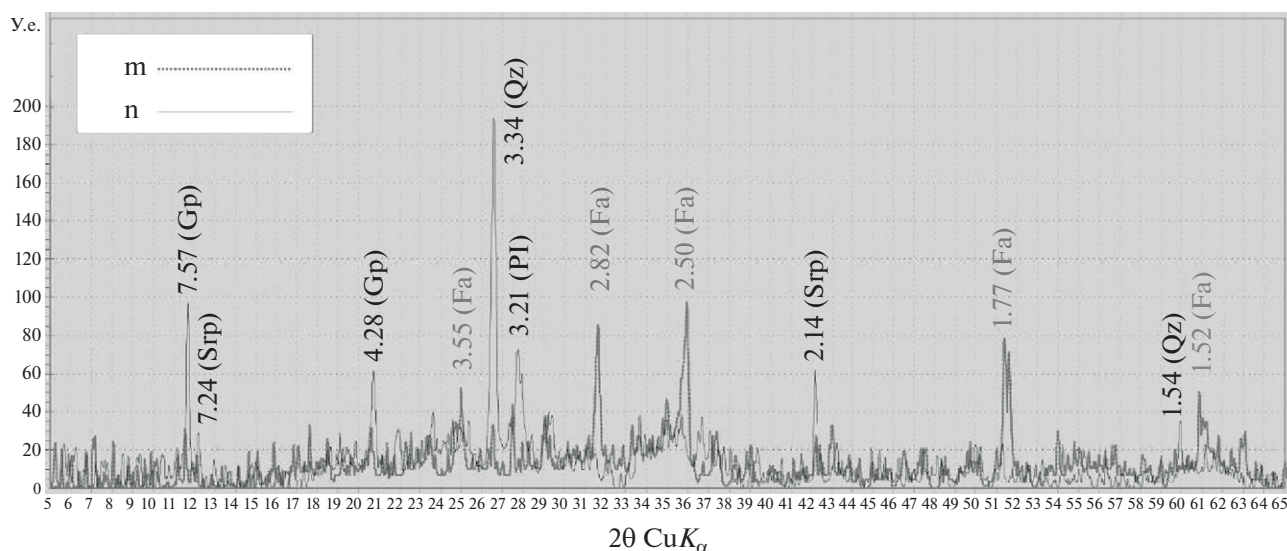


Рис. 1. Дифрактограмма металлургического шлака: *m* – магнитная фракция, *n* – немагнитная фракция (Fa – фаялит, Gp – гипс, Pl – плагиоклаз, Qz – кварц, Srp – серпентин).

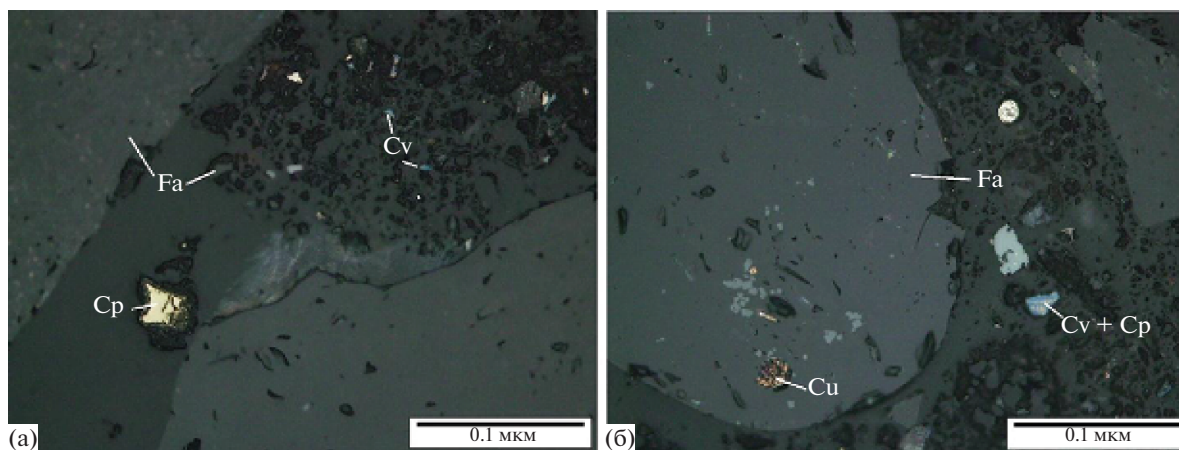


Рис. 2. Фотографии аншлифов металлургического шлака: Fa – фаялит, Cv – ковеллин, Cp – халькопирит, Cu – медь металлическая.

ФИЦ Биотехнологии РАН. Для получения указанных сообществ (инокулята) суспензии чистых культур микроорганизмов в экспоненциальной фазе роста смешивали в равных объемах. При этом все чистые культуры микроорганизмов для получения сообществ культивировали при 45°C. Численность микроорганизмов чистых культур составила: *L. ferriphilum* – 5×10^8 кл./мл, *S. thermosulfidoxidans* – 3×10^7 кл./мл, *Acidiplasma* sp. – 2×10^8 кл./мл.

Полученные микробные сообщества (смешанные культуры) культивировали в течение 1 сут при соответствующих температурах на модифицированной среде Сильвермана и Лундгрена 9К, содержащей 8.5 г/л Fe^{2+} и 0.02% дрожжевого экстракта [22]. Начальную величину pH устанавливали на уровне 1.4 добавлением 98.5%-ной серной кислоты.

Биовыщелачивание. Опыты проводили в конических колбах объемом 250 мл с объемом суспензии в них 100 мл на термостатируемых качалках при 190 об./мин⁻¹. В колбы вносили 1, 2 или 4 г шлакового материала, 90 мл модифицированной среды 9К и 10 мл посевного материала. Таким образом, плотность пульпы в опытах составляла 1, 2 или 4%. Исходное значение pH устанавливали на уровне 1.2 добавлением 98.5%-ной серной кислоты. Процесс биовыщелачивания шлака проводили до полного окисления железа в жидкой фазе, но не более 9 сут.

После биовыщелачивания осадок отделяли от жидкой фазы фильтрованием на бумажном фильтре “синяя лента”, промывали дистиллированной водой, высушивали и определяли его массу.

Химическое выщелачивание. Химическое выщелачивание шлака проводили в конических колбах на 250 мл с объемом суспензии 100 мл на термостатируемых качалках при 190 об./мин и содержании твердой фазы в суспензии 1 или 4%. В качестве жидкой фазы использовали среду 9К, не содержащую солей железа и эту же среду с добавлением соли $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ вместо железа (II) сульфата.

Исходное значение pH устанавливали на уровне 1.2 добавлением 98.5%-ной серной кислоты. Выщелачивание проводили в течение 24 ч.

Аналитические методы. Значения pH измеряли с помощью pH-метра pH-150МИ (“Измерительная техника”, Россия). Концентрации Fe^{3+} в жидкой фазе определяли титриметрическим методом с трилоном Б [23]. Концентрацию Fe^{2+} определяли тем же методом по разнице концентраций после полного окисления железа добавлением аммоний пероксодисульфата. Концентрацию ионов меди и никеля определяли на атомно-абсорбционном спектрометре с пламенной атомизацией 3100 (“Perkin Elmer”, США).

Содержание железа, меди, никеля и серы в твердых веществах было проанализировано растворением пробы в смеси соляной и азотной кислот при кипячении с добавлением фторида аммония [24], а затем методом атомной абсорбции с пламенной атомизацией (“Perkin Elmer” Analyst-800, США) для железа, меди и никеля, а также гравиметрическим анализом с использованием хлорида бария для серы.

Минеральный состав пробы шлака был определен методом рентгеновской порошковой дифрактометрии с использованием дифрактометра ДРОН-2 (Буревестник, Россия) при следующих параметрах работы: 20 кВ, 15 мА, 4°/с, CuKα – медное фильтрованное излучение. Препараты готовили путем осаждения спиртовой суспензии на стеклянную пластинку. Также был использован минераграфический анализ рудных минералов в монтированных аншлифах (полированные брикеты из порошковых проб, скрепленных эпоксидным клеем). Рудные минералы изучали в отраженном и отраженно-проходящем свете на поляризационном микроскопе VX 51 (“Olympus”, Япония) со встроенной фотокамерой. Содержание минералов определено по соотношению пиков на дифракто-

граммах, по соотношению минералов в аншлифах и с учетом данных химического анализа.

Извлечение металла в раствор (%) рассчитывали по формуле:

$$\delta = \frac{C \cdot V}{m_{\text{исх}} \cdot \beta} \cdot 100, \quad (1)$$

где C – концентрация металла в растворе (г/л), V – объем жидкой фазы (л), $m_{\text{исх}}$ – масса исходного шлака (г) в суспензии, β – содержание металла в шлаке (мас. дол.).

Выход твердой фазы (%) определяли по формуле:

$$\gamma = \frac{m_{\text{ос}}}{m_{\text{исх}}} \cdot 100, \quad (2)$$

где $m_{\text{ос}}$ – масса осадка (г) после биовыщелачивания.

Скорость биовыщелачивания шлака (г/(л·сут)) рассчитывали по формуле:

$$\vartheta = \frac{(m_{\text{исх}} - m_{\text{ос}})}{V \cdot \tau}, \quad (3)$$

где τ – время выщелачивания (сут).

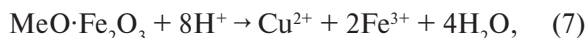
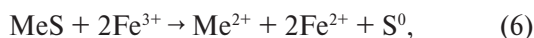
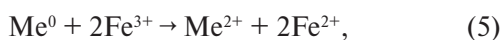
Удельная скорость биовыщелачивания шлака (г/(г·сут)) была рассчитана по формуле:

$$\vartheta = \frac{(m_{\text{исх}} - m_{\text{ос}})}{m_{\text{исх}} \cdot \tau}, \quad (4).$$

Тесты выполнялись в трех повторностях с расчетом среднего арифметического значения каждой величины при использовании Microsoft Excel 2021.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Так как основная часть меди и никеля в шлаке сосредоточена в сульфидах в сростках со стеклом, окисленных минералах и металлической форме, то эти соединения могли быть окислены в водных растворах сульфата трехвалентного железа или растворены в кислой среде:



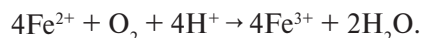
где Me – Cu, Ni.

Вместе с тем, металлургический шлак содержал значительное количество силикатного железа в составе фаялита. Вместе с тем цветные металлы также частично присутствовали в составе силикатов. Растворение силикатов в сернокислотной среде может быть представлено следующим образом:



где Me – металл (Fe, Ni, Cu).

Анализ представленных реакций показывает, что в процессе выщелачивания шлаков в сульфатных растворах должны образовываться ионы Fe^{2+} , которые являются субстратом для железоокисляющих хемолитотрофных микроорганизмов:



Влияние температуры. Результаты исследований по влиянию температуры на изменение концентрации железа в зависимости от времени биовы-

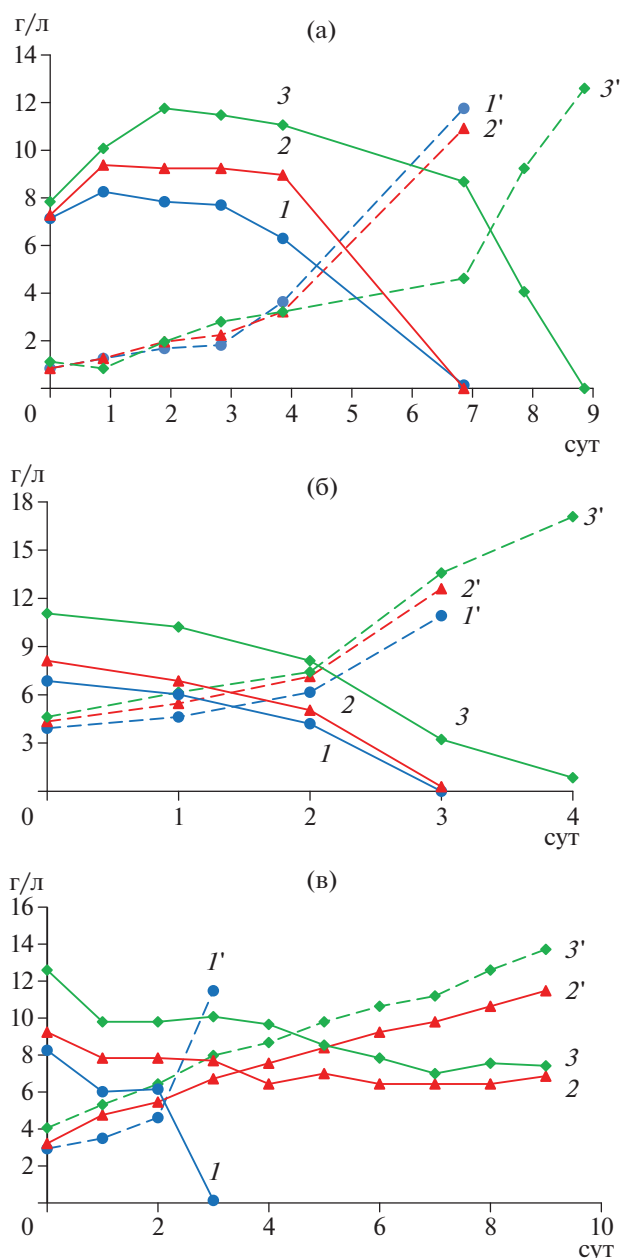


Рис. 3. Изменение концентрации Fe^{2+} (1, 2, 3) и Fe^{3+} (1', 2', 3') в ходе биовыщелачивания шлака при содержании твердой фазы 1 (1, 1'), 2 (2, 2') и 4% (3, 3') при 40 (а), 45 (б) и 50°C (в).

щелачивания при 40, 45 и 50°C представлены на рис. 3. Из результатов следует, что в процессе биовыщелачивания шлаков наблюдалось постепенное увеличение концентрации ионов Fe²⁺ (в первые сутки процесса), которые постепенно окислялись до Fe³⁺. При этом в конце биовыщелачивания все железо было представлено окисленной формой, и чем выше было содержание твердой фазы в пульпе, тем больше железа переходило в жидкую фазу. При 40°C полное окисление железа наблюдалось на 7–9 сут, а при 45°C почти полное окисление Fe²⁺ было зафиксировано на 3–4 сут биовыщелачивания. При биовыщелачивании при 50°C и низком содержании шлака (1%) полное окисление Fe²⁺ протекало также за трое сут. Однако при более высоком содержании шлака (2 и 4%) полного окисления Fe²⁺ не наблюдалось даже на девятые сут. Очевидно скорость выщелачивания железа из шлака превышала скорость биоокисления Fe²⁺ до Fe³⁺.

Таблица 1. Влияние температуры на выход твердой фазы при биовыщелачивания шлака до полного окисления Fe²⁺

| Температура, °C | Содержание шлака, % | Время, сут | Выход осадка, % |
|-----------------|---------------------|------------|-----------------|
| 40 | 1 | 4 | 52 |
| | 2 | 5 | 50 |
| | 4 | 6 | 55 |
| 45 | 1 | 3 | 35 |
| | 2 | 3 | 40 |
| | 4 | 4 | 44 |
| 50 | 1 | 3 | 37 |
| | 2 | 9 | 54 |
| | 4 | 9 | 58 |

Процесс биовыщелачивания при низком содержании шлака (1%) мало отличался по количеству железа, перешедшего в жидкую фазу, при всех исследованных значениях температуры. При этом количество растворенного железа не зависело от процесса биоокисления ионов Fe²⁺ до Fe³⁺. Основное количество ионов железа переходило в жидкую фазу в течение 3 сут процесса при всех выбранных значениях температуры и содержании твердой фазы.

По завершению каждого опыта биовыщелачивания шлака определяли массу осадка и по полученным данным оценивали количество растворенной твердой фазы и выход осадка после биовыщелачивания в зависимости от температуры. Результаты расчетов приведены в табл. 1. Из данных следует, что в процессе биовыщелачивания выход осадка составлял от 35 до 58%, а было растворено соответственно от 65 до 42% твердой фазы в зависимости от температуры и содержания шлака.

На основании полученных данных была рассчитана скорость растворения твердой фазы, а также удельная скорость ее растворения. Результаты расчетов приведены на рис. 4. Из результатов видно, что скорость биовыщелачивания шлаков была тем выше, чем больше было содержание шлака в суспензии. Так, скорость снижения количества твердой фазы в выщелачивающем растворе составила от 1.2 до 5.6 г/(л·сут), а максимальная скорость была зафиксирована при 45°C. При этой температуре этот показатель был максимальным при всех значениях содержания шлака в суспензии. Удельная скорость биовыщелачивания была максимальной при минимальном содержании шлака и составила от 0.12, 0.216 и 0.21 г/(г·сут) при 40, 45 и 50°C соответственно.

Таким образом, наиболее эффективно процесс биовыщелачивания шлаков протекал при 45°C и характеризовался максимальной скоростью рас-

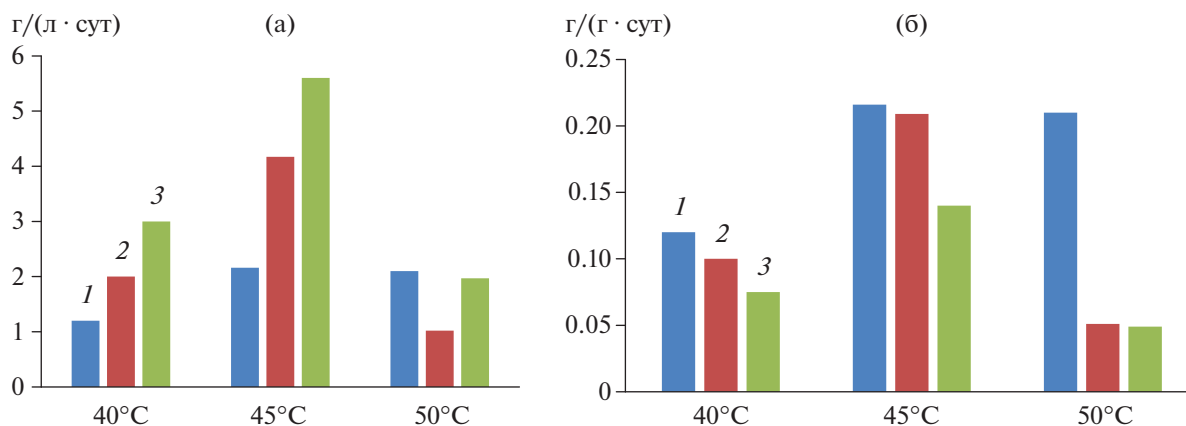


Рис. 4. Средняя скорость (а) и средняя удельная скорость (б) биовыщелачивания шлака при содержании твердой фазы 1 (1), 2 (2) и 4% (3).

Таблица 2. Концентрация металлов в растворе и их извлечение в ходе биовыщелачивания шлака при 45°C

| Время, сут | Содержание шлака, % | Концентрация, мг/л | | Извлечение, % | | | Прирост ΣFe , г/л |
|------------|---------------------|--------------------|------|---------------|------|-----|---------------------------------|
| | | Cu | Ni | Cu | Ni | Fe | |
| 1 | 1 | 226 | 279 | 100 | 100 | 67 | 2.1 |
| | 2 | 431 | 532 | 95.5 | 95.3 | 65 | 4.3 |
| | 4 | 864 | 1032 | 95.5 | 92.3 | 64 | 5.8 |
| 2 | 1 | 234 | 290 | 100 | 100 | 84 | 2.6 |
| | 2 | 460 | 570 | 98.3 | 98.3 | 81 | 4.9 |
| | 4 | 911 | 1200 | 99.0 | 100 | 75 | 6.8 |
| 3 | 1 | 236 | 287 | 100 | 100 | 100 | 3.1 |
| | 2 | 464 | 575 | 100 | 100 | 100 | 6.0 |
| | 4 | 920 | 1205 | 100 | 100 | 82 | 7.3 |
| 5 | 4 | 1072 | 1265 | 100 | 100 | 82 | 7.3 |

творения шлака и минимальным временем окисления Fe^{2+} до Fe^{3+} (рис. 3б).

Основными ценными компонентами в исследуемом шлаке были цветные металлы – никель и медь, которые должны выщелачиваться из шлаков наряду с железом. Для определения их концентрации в жидкой фазе при 45°C отбор проб проводили один раз в сутки. Результаты исследований по определению концентраций металлов и их извлечению в жидкую фазу при 45°C приведены в табл. 2. Из результатов следует, что концентрации растворенных цветных металлов достигали высоких значений уже в первые часы и в первые сутки за счет химического и биологического выщелачивания легкоокисляемых соединений. В дальнейшем происходило в основном медленное биовыщелачивание железа

из шлака, подтверждаемое продолжающимся увеличением его концентрации в растворе. Полученные результаты показали, что медь и никель находились в шлаке в форме легкорастворимых соединений в отличие от железа в составе фаялита.

Сравнение с промышленными примерами биогидрометаллургии [25, 26] показало, что биовыщелачивание цветных металлов из шлака протекало значительно эффективнее, чем разрушение сульфидных минералов. Так, биоокисление сульфидных минералов протекает относительно долго (в течение нескольких суток), в то время как биовыщелачивание цветных металлов из шлака продолжалось менее суток (табл. 2).

Химическое выщелачивание. Основываясь на полученных результатах, характеризовавшихся быст-

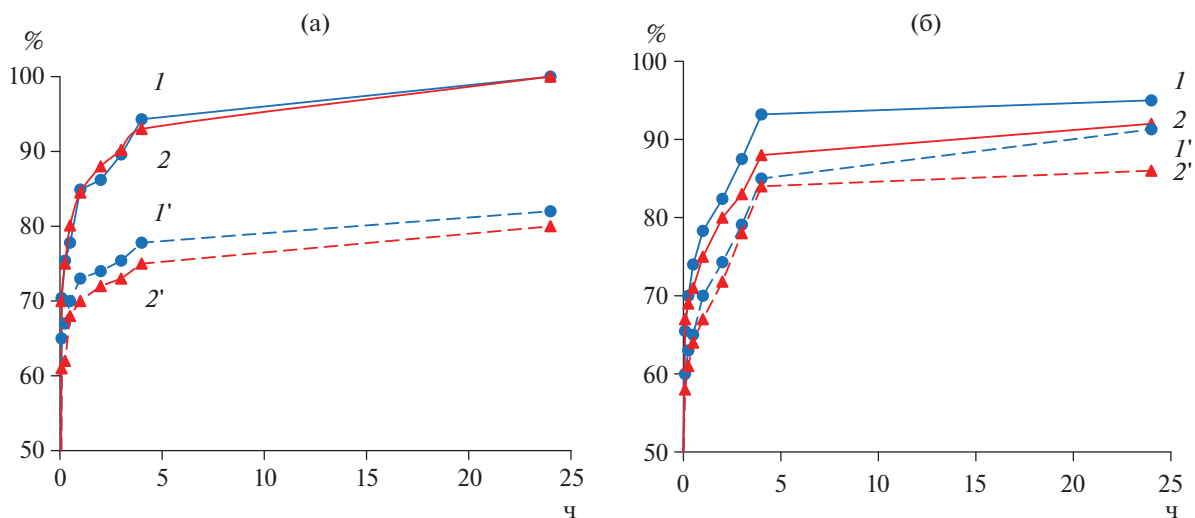


Рис. 5. Извлечение меди (I, I') и никеля (2, 2') из шлака при химическом выщелачивании в присутствии 5 г/л Fe^{3+} (I, 2) и без него Fe^{3+} (I', 2') в среде при содержании шлака 1% (а) и 4% (б) при 45°C.

рым выщелачиваем металлов из шлака, для определения наиболее эффективных условий биовыщелачивания целесообразно было изучить поведение цветных металлов в течение первых часов выщелачивания шлака. Для этого были проведены две серии опытов химического выщелачивания при 45°C при содержании шлака в суспензии 1 и 4%: в присутствии 5 г/л Fe³⁺ и без такового. Значение pH устанавливали на уровне 1.2.

Результаты исследований приведены на рис. 5. Из результатов следует, что основное количество цветных металлов переходило в жидкую фазу в первый час выщелачивания (более 60%) как при содержании шлака 1%, так и 4%. В сернокислотной среде без окислителя Fe³⁺ выщелачивание цветных металлов протекало медленней, чем в его присутствии. За первые 4 ч процесса выщелачивание цветных металлов приближалось к полному извлечению. Так, при 1%-ном содержании шлака в среде извлечение меди и никеля кислотным раствором достигало 77.8 и 75%, а с добавлением окислителя Fe³⁺ – 94.3 и 93.0% соответственно. За последующие 21 ч количество извлеченных металлов возросло только на 5–7%. При 4%-ном содержании шлака в среде относительное извлечение цветных металлов было ниже, чем при 1%-ном, и составило за 1 сут 85 и 95%.

Полученные результаты свидетельствовали о том, что основное количество никеля и меди в шлаке присутствовало в кислоторастворимой форме, вероятно, в форме рассеянных окислов, и переходили в раствор по реакции (7). Однако более высокие показатели извлечения цветных металлов в присутствии Fe³⁺ свидетельствовали о том, что около 5–7% цветных металлов переходило в жидкую фазу по реакциям (5) и (6). Это указывает на возможность присутствия цветных металлов в металлической и сульфидной форме.

Таким образом, показано, что медь и никель в исследованном металлургическом шлаке находились преимущественно в легкорастворимой форме и переходили в раствор под действием сернокислотного раствора. Добавление к этому раствору окисного железа Fe³⁺ в качестве окислителя ускорило выщелачивание металлов. Переработка шлака с использованием ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов является привлекательной технологией за счет того, что микроорганизмы в этом процессе: 1) ведут длительный процесс выщелачивания металлов из трудно окисляемых химических фракций; 2) окисляют Fe²⁺, поступающее в среду при растворении силиката железа (фаялита). Благодаря биоокислению железа и возможному его удалению в виде нерастворимых форм дальнейшие этапы извлечения металлов с использованием экстракционных технологий возможны из растворов, уже свободных от Fe²⁺.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-24-00187).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит результатов исследований с использованием животных в качестве объектов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schodde R., Guj P. // *Geosyst. GeoenvIRON.* 2025. V. 4. P. 100356. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2025.100356>
2. Zhang Z., Zhang W., Zhang Z., Chen X. // *China Geol.* 2025. V. 8. P. 187–213. <https://doi.org/10.31035/cg2024124>
3. Kalungi P., Yao Z., Huang H. // *Materials.* 2024. V. 17. P. 4389. <https://doi.org/10.3390/ma17174389>
4. Đorđević T., Tasev G., Aicher C., Potysz A., Nagl P., Lengauer C.L. et al. // *Appl. Geochem.* 2024. V. 170. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106068>
5. Kupczak K., Warchulski R., Ettler V., Mihaljevič M. // *J. Geochem. Explor.* 2025. V. 273. P. 107743. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2025.107743>
6. Yanning S., Qiao H., Qiong F., Chao W., Jianghua Z. // *J. Build. Eng.* 2024. V. 96. P. 110632. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.110632>
7. Afaque M., Roy S., Khan R.A. // *Water and Energy Int.* 2025. V. 67. P. 20–27.
8. Gurieva V.A., Ilyina A.A. // 2024. V. 81. P. 34–38. <https://doi.org/10.1007/s10717-024-00654-5>
9. Yan Y., Sun S., Yang K., Xiao F., Tu G., Sui C., Yu K. // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2025. V. 32. P. 4523–4538. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-35909-3>
10. Klaffenbach E., Montenegro V., Guo M., Blanpain B. // *J. Sustainable Met.* 2023. V. 9. P. 468–496. <https://doi.org/10.1007/s40831-023-00683-4>
11. Sethurajan M., van Hullebusch E.D., Nancha-raiah Y.V. // *J. Environ. Manage.* 2018. V. 211. P. 138–153. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2018.01.035>
12. Potysz A., Pędziwiatr A., Hedwig S., Lenz M. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2020. V. 8. P. 104450. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104450>
13. Muravyov M.I., Fomchenko N.V., Kondrat'eva T.F. // *Appl. Biochem. Microbiol.* 2011. V. 47. P. 607–614. <https://doi.org/10.1134/S0003683811060093>
14. Fomchenko N.V., Muravyov M.I. // *Appl. Biochem. Microbiol.* 2017. V. 53. P. 73–77. <https://doi.org/10.1134/S0003683817010197>

- 15 *Karimi Darvanjooghi M.H., Magdouli S., Brar S.K.* // World J. Microbiol. Biotechnol. 2024. V. 40. P. 67. <https://doi.org/10.1007/s11274-024-03887-2>
- 16 *Roberto F.F., Schippers A.* // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2022. V. 106. P. 5913–5928. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-12085-9>
- 17 *Fomchenko N., Muravyov M.* // Minerals. 2020. V. 10. P. 1097. <https://doi.org/10.3390/min10121097>
- 18 *Kaksonen A.H., Särkijärvi S., Puhakka J.A., Peuraniemi E., Junnikkala S., Tuovinen O.H.* // Hydrometallurgy. 2016. V. 159. P. 46–53. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2015.10.032>
- 19 *Potysz A., Lens P.N.L., van de Vossenberg J., Rene E.R., Grybos M., Guibaud G., et al.* // Appl. Geochem. 2016. V. 68. P. 39–52. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOCHEM.2016.03.006>
- 20 *Wang J., Huang Q., Li T., Xin B., Chen S., Guo X. et al.* // J. Environ. Manage. 2015. V. 159. P. 11–17. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2015.05.013>
- 21 *Fomchenko N.V., Murav'ev M.I.* // Appl. Biochem. Microbiol. 2015. V. 51. P. 388–392. <https://doi.org/10.1134/S0003683815040079>
- 22 *Silverman M.P., Lundgren D.G.* // J. Bacteriol. 1959. V. 77. P. 642–647. <https://doi.org/10.1128/jb.77.5.642-647.1959>
- 23 *Davis. D.G., Jacobsen W.R.* // Anal. Chem. 1960. V. 32. P. 215–217. <https://doi.org/10.1021/ac60158a024>
- 24 *Филиппова Н.А.* Фазовый анализ руд и продуктов их переработки / Ред. Абрамова В.Л. М.: Химия, 1975. 280 с.
- 25 *Brierley C.L., Brierley J.A.* // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2013. V. 97. P. 7543–7552. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5095-3>
- 26 *Olson G.J., Brierley J.A., Brierley C.L.* // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2003. V. 63. P. 249–257. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1404-6>

Bioleaching of Nickel-Containing Metallurgical Slag by Chemolithotrophic Microorganisms at Various Temperatures

N. V. Fomchenko^a, G. V. Novikov^a, V. S. Melamud^a, M. I. Muravyov^{a,*}

^aWinogradsky Institute of Microbiology, Research Center of Biotechnology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia

*e-mail: maxmuravyov@inmi.ru

The bioleaching process of metallurgical slag containing nickel and copper was investigated at temperatures of 40, 45, and 50°C. The experiments involved microbial communities cultivated at 40 and 45°C, which comprised the bacteria *Leptospirillum ferriphilum* and *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*. The microbial community established at 50°C included representatives of *S. thermosulfidooxidans* and *Acidiplasma* sp. The findings indicate that the dissolution of the solid phase and the oxidation of ferrous iron by microorganisms reached their highest levels at 45°C. Under these conditions, the majority of copper (95.5–100%) and nickel (92.3–100%) released into solution within the first day of bioleaching. Kinetic studies of chemical leaching of non-ferrous metals during the initial four hours demonstrated that the presence of 5 g/l Fe³⁺ resulted in the extraction of 93.0% nickel and 94.3% copper, whereas, in the absence of Fe³⁺, 75.0% of nickel and 77.8% of copper were extracted.

Keywords: biohydrometallurgy, nickel slag, metallurgical waste, bioleaching, acidophilic microorganisms