

Код МРНТИ 53.37.15

К.К. Мамырбаева¹, *А.Н. Куандыкова¹, Е.С. Меркибаев¹, Б. Мишра²¹Satbayev University (г. Алматы, Казахстан),²Вустерский политехнический институт (г. Вустер, США)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУЛЬФАТИЗИРУЮЩЕГО ОБЖИГА ЛАТЕРИТНОЙ ОКИСЛЕННОЙ НИКЕЛЕВОЙ РУДЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ

Аннотация. В связи с ростом спроса на никель и кобальт для литий-ионных аккумуляторов электротранспорта возрастает интерес к освоению новых источников сырья, включая техногенные отвалы. Объектом исследования являлась латеритная руда месторождения Кемпирсай, в которой никель и кобальт представлены преимущественно в оксидной форме. Цель работы – изучение извлечения металлов с применением комбинированной технологии, включающей сульфатизирующий обжиг и последующее водное выщелачивание. Оптимальные условия обжига: 30 мас. % серной кислоты, температура 500 °С и продолжительность 60 мин. В результате выщелачивания получен продуктивный раствор с содержанием (г/л): *Ni* 2,33; *Co* 0,67; *Fe* 18,5. Для дальнейшей переработки рекомендованы осаждение железа и селективное разделение никеля и кобальта методом экстракции.

Ключевые слова: латеритная руда, никель, кобальт, сульфатизирующий обжиг, серная кислота, выщелачивание.

Латеритті тотыққан никель кенін қайта өңдеудің аралас техноогиясын әзірлеу үшін сульфатты күйдіру процесін зерттеу

Андатпа. Электрқозғалтқыш аккумуляторларын өндіруде никель мен кобальтқа сұраныстың артуына байланысты, соның ішінде техногендік үйінділерді қоса алғанда, жаңа кен көздерін игеруге қызығушылық артты. Зерттеу нысаны Кемпірсай кен орнының латеритті кені болып табылады, онда никель мен кобальт оксидтік түрде кездеседі. Жұмыстың максаты – металдарды біріктірілген әдіспен, яғни сульфаттандырушы күйдіру және кейінгі сулы шаймалау арқылы алу үдерісін зерттеу. Күйдірудің оңтайлы шарттары: күкірт қышқылын 30% (массалық) қосу, температура 500 °С және ұзақтығы 60 минут. Күйдірме өнімін шаймалау нәтижесінде құрамында (г/л): 2,33 *Ni*, 0,67 *Co* және 18,5 *Fe* бар өнімді ерітінді алынды. Ерітіндіні әрі қарай өңдеу үшін темірді химиялық тұндыру және никель мен кобальтты сұйық экстракция әдісімен селективті бөлу ұсынылады.

Түйінді сөздер: латеритті кен, никель, кобальт, сульфатты күйдіру, күкірт қышқылы, шаймалау.

Research on the process of sulfatizing roasting of lateritic oxidized nickel ore for the development of a combined processing technology

Abstract. Due to the increasing demand for nickel and cobalt for lithium-ion batteries used in electric vehicles, interest in the development of new raw material sources, including technogenic dumps, has grown. The object of this study was lateritic ore from the Kempirsai deposit, in which nickel and cobalt are predominantly present in oxide form. The aim of the work was to investigate metal recovery using a combined processing route comprising sulfation roasting followed by water leaching. The optimal roasting conditions were 30 wt. % sulfuric acid addition, a temperature of 500 °C, and a roasting time of 60 min. Leaching resulted in a pregnant solution containing (g/L): 2.33 *Ni*, 0.67 *Co*, and 18.5 *Fe*. For further processing, iron precipitation and selective separation of nickel and cobalt by solvent extraction are recommended.

Key words: lateritic ore, nickel, cobalt, sulfatizing roasting, sulfuric acid, leaching.

Введение

Широкое использование никеля в сталелитейной промышленности, гальванизации сплавов и производстве аккумуляторов, в сочетании с растущим спросом на кобальт в секторе зеленой энергетики, привело к значительному увеличению производства никеля в последние годы [1, 2].

Казахстан обладает достаточными запасами латеритных никелевых руд и входит в двадцатку стран-лидеров по запасам никеля с мировыми запасами 2% (1,5 млн тонн) [3]. Производство никеля из окисленных или латеритных руд набирает популярность, но в настоящее время значительная часть мирового производства по-прежнему приходится на сульфидные никелевые руды.

На практике извлечение никеля из латеритных минералов осуществляется с помощью таких процессов, как: процесс Карона [4], кислотное выщелачивание под высоким давлением (HPAL) [5], кислотное выщелачивание при атмосферном давлении (AAL) [6, 7]. Среди гидрометаллургических методов переработки латеритов процесс HPAL является наиболее эффективным для извлечения никеля и кобальта. Хотя его высокие капитальные и эксплуатационные затраты являются значительным недостатком, важно отметить, что большинство коммерческих установок по переработке латеритов во всем мире являются, по сути,

заводами HPAL. Другие методы, такие как AAL, характеризуются более низкой селективностью и извлечением ценных металлов, что часто сопровождается высоким потреблением реагентов.

В качестве выщелачивающих агентов используются серная, соляная и органические кислоты. Прямое выщелачивание руд имеет серьезные недостатки: большой расход кислоты, длительное время выщелачивания и необходимость удаления примесей, таких как железо, алюминий и хром. Извлечение железа – особенно острая проблема, так как это ведет к потере никеля и магния из-за соосаждения и адсорбции.

Для повышения эффективности процесса применяют различные виды предварительной методов обработки: механическую, микроволновую, ультразвуковую, термическую активацию. Среди всех методов предварительной подготовки высокой эффективностью обладает термическая активация с добавлением различных веществ, таких как серная кислота, сульфатные соли, хлорирование с различными хлорсодержащими веществами.

Переработка латеритов методом «сульфатизирующий обжиг – водное выщелачивание» [8–9] – это один из потенциальных методов переработки упорных, бедных латеритных руд, основанный на термическом преобразовании оксидов и

сульфидов металлов в водорастворимые сульфаты, с дальнейшим водным выщелачиванием. Такой способ переработки позволяет легко извлекать ценные металлы, такие как никель, кобальт, железо, а также других примесных металлов (*Al*, *Cr*, *Mn*, *Mg*) в продуктивный раствор. По сравнению с другими пирометаллургическими процессами, этот метод имеет ряд преимуществ, включая относительно низкую температуру обжига, короткую продолжительность, высокое одновременное извлечение ряда ценных металлов и селективность. Благодаря этим достоинствам, сульфатизирующий обжиг уже широко применяется для переработки руд, содержащих литий, цинк, алюминий и редкоземельные элементы. Проведено множество исследований, посвященных извлечению никеля и кобальта из различных типов латеритных руд. Тем не менее, в доступной научной литературе нет сведений о применении этого метода к казахстанским латеритам, что подчеркивает актуальность и необходимость проведения соответствующих исследований.

Целью настоящей работы является исследование оптимальных условий сульфатизирующего обжига для извлечения никеля и кобальта из латеритной руды месторождения Кемпирсай.

Методика исследований

Методика исследований образцов

Фазовый состав исходной руды и кека (твердых остатков выщелачивания) был исследован методом рентгеновской дифракции (РФА). Измерения проводились на дифрактометре Bruker D8 Advance с использованием *Cu* K α -излучения при напряжении 40 кВ и токе 30 мА.

Микроструктура и морфология остатков выщелачивания

Концентрация целевых металлов (никель (*Ni*), кобальт (*Co*)) и основных примесей, включая железо (*Fe*), алюминий (*Al*) и магний (*Mg*) и др. в водных растворах определяли атомно-абсорбционным спектрометрическим анализом (ААС) с использованием прибора Shimadzu AA-7000.

Морфология поверхности и химический состав выбранных точек на поверхности были изучены с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEOL JSM-6490LA.

Методика сульфатизирующего обжига – водного выщелачивания

Исходный рудный материал перемешивали с концентрированной серной кислотой. Полученную смесь подвергали контролируемому обжигу в муфельной печи при заданной температуре и выдерживали в течение определенного времени для достижения полной сульфатизации.

Выщелачивание проводилось в термостате, что позволяло точно поддерживать заданную температуру на протяжении всего эксперимента. Процесс осуществляли при постоянном перемешивании со скоростью 300 об/мин. Эксперименты по выщелачиванию проводились в условиях: температура 85 °С, соотношение твердого к жидкому = 1:6, продолжительность выщелачивания 120 минут. По завершении полученную суспензию разделяли методом вакуумной фильтрации. Полученный твердый остаток был промыт и высушен при 105 °С до постоянной массы.

Результаты и обсуждение

Состав исходной руды

Объектом исследования явилась латеритная руда Кемпирсайского месторождения, расположенного на Западном Казахстане. Физико-химическими анализами были установлены фазовый и химический состав руды (таблица 1, рис. 1).

Результаты РФА показывают, что основные минеральные фазы исследуемого образца руды включают кварц [*SiO*₂], сепиолит [*Mg₄Si₆O₁₅(OH)₂•6H₂O*], клинохлор-Пб-4 [*Mg₃(Mg₂Al)((Si₃Al)O₁₀(OH)₂O₃)*], пирофиллит [*Al₂(Si₄O₁₀O)*], силикат магния и алюминия (*Mg₂Al₄Si₅O₁₈*) и гетит [*FeO(OH)*]. Основным рудоносным минералом является гетит, в кристаллическую структуру которого встроены атомы никеля и кобальта [10].

Прямое извлечение никеля и кобальта из такого вида сырья минеральными кислотами неэффективно из-за высокого расхода реагентов, многокомпонентности продуктивных растворов, использования стойких к коррозии оборудования и др.

Для переработки такого вида латеритов можно применять комбинированный способ переработки, включающий сульфатизирующий обжиг с дальнейшим водным выщелачиванием [8–9].

В данном исследовании первой задачей было исследование оптимальных условий сульфатизирующего обжига с использованием серной кислоты, как эффективного, доступного сульфатизирующего реагента.

Химический анализ руды показал, что содержание никеля и кобальта в руде низкое и составляют 1,1 и 0,1% соответственно, основной примесью является железо и содержится в количестве 21%.

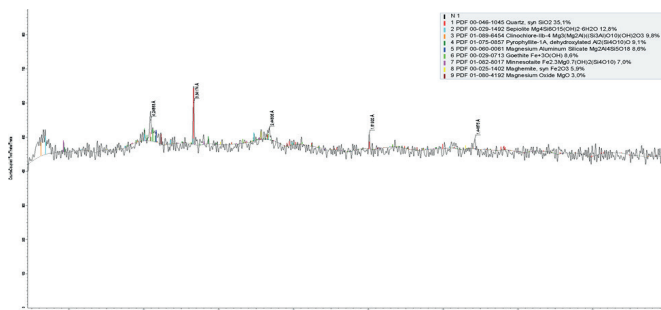


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма латеритной руды.

Сурет 1. Латеритті кеннің рентгендік дифракциялық көрінісі.

Figure 1. X-ray diffraction pattern of the laterite ore.

Таблица 1

Основные химические компоненты руды, %

Кесте 1

Кеннің негізгі химиялық компоненттері, %

Table 1

Main chemical components of ore, %

O	Mg	Al	Si	Fe	Co	Ni	Cr	Mn	Ca	Cl	Na
49.5	1.8	2.2	15.4	21	0.1	1.1	0.6	0.6	0.8	0.3	0.7

Влияние количества сульфатизирующего агента на извлечение металлов

Для исследования влияния одного из ключевых факторов – количества серной кислоты на эффективность сульфатизирования при обжиге руды, была проведена серия экспериментов. Температура (500–550 °С) и продолжительность процесса (60 минут) поддерживались постоянными. В каждой серии экспериментов варьировали массовое соотношение серной кислоты к руде в интервале 10–50% для определения оптимальных условий. Как видно из рис. 2а, степень извлечения *Ni*, *Co*, и *Fe* увеличивалась с увеличением соотношения кислоты к руде. При соотношении серной кислоты к руде от 10 до 30% наблюдалось повышение степени извлечения металлов примерно в 1,5–2 раза и добавка серной кислоты в количестве 30% позволила достичь максимального извлечения никеля (93,8%) и кобальта (92,3%) соответственно. Дальнейшее повышение серной кислоты от 30 до 50% привели к росту степени извлечения металлов всего на 1–2,5%.

Несмотря на высокую степень извлечения металлов, с ростом количества сульфатизирующего агента увеличилась плотность растворов, образовались мелкодисперсные гелеобразные железистые осадки. Повышенная концентрация серной кислоты (30% и выше) приводит к растворению большинства компонентов руды, в том числе упорных минералов пустой породы, содержащих щелочные и щелочноземельные металлы. Это, в свою очередь, привело к повышению pH среды. В результате изменения pH образовывались гелеобразные осадки, которые резко увеличивали время фильтрации и адсорбировали целевые металлы, делая весь процесс неэффективным с технологической точки зрения. Аналогичные процессы были зафиксированы в исследовании [11]. В этой связи для сульфатизации латеритной руды оптимальной концентрацией серной кислоты была выбрана добавка в количестве 30%.

Влияние температуры обжига

Результаты экспериментов по изучению влияния температуры обжига на степень извлечения металлов представлено на рисунке 2б. Эксперименты проводились в интервале температуры 350–750 °С при соотношении кислоты к руде 30% и времени обжига 60 мин. С ростом температу-

ры обжига от 400 до 550 °С извлечение никеля и кобальта увеличилось от 80 до 91,5; от 77,3 до 91% соответственно. При температуре обжига выше 550 °С степень извлечения никеля и кобальта резко снизилась. Значительное падение степени извлечения в раствор *Fe* наблюдалось уже при температуре 550 °С и выше. Это объясняется с началом разложения сульфата железа (450 ~ 480 °С), а также сульфатов никеля и кобальта (740 °С и выше) на их собственные оксиды [12]. Разложение сульфата железа до гематита нежелательно из-за его нерастворимости в воде оксида, так как в его кристаллической структуре могут содержаться остатки никеля и кобальта. В связи с этим оптимальной температурой обжига был выбран диапазон 500–550 °С.

Влияние продолжительности обжига

Полученные результаты представлены на рис. 2. При увеличении времени обжига с 30 до 60 минут степень извлечения никеля и кобальта повысилась почти в два раза: с 45,2 до 92,3% для никеля и с 54,3 до 89% для кобальта. Дальнейшее увеличение продолжительности обжига не оказало существенного влияния на степень извлечения целевых металлов. Извлечение железа при обжиге 60 минут было ниже чем у основных металлов и составило 80,5%. Кроме того, более длительное время обжига способствовало разложению сульфатов железа до оксидов. Полученные данные позволяют заключить, что 60 минут является достаточным временем для достижения максимального извлечения *Ni* и *Co*.

Для получения дополнительной детальной информации об изменении морфологии и химического состава поверхности частиц в процессе «сульфатизирующий обжиг – водное выщелачивание» были проведены и сопоставлены СЭМ и ЭДС-исследования исходной руды и кека выщелачивания.

Как показывает микроструктура поверхности, представленная на рис. 3а, исходная руда характеризуется неупорядоченной, высокопористой структурой, типичной для выветренных почвенных пород. Она состоит из конгломерата частиц различной морфологии и размера, включая как относительно крупные зерна, так и обширную фракцию тонкодисперсных частиц. Наличие значительного межчастичного пространства обуславливает низкую степень цементации и высокую общую пористость. В то же время, результаты СЭМ

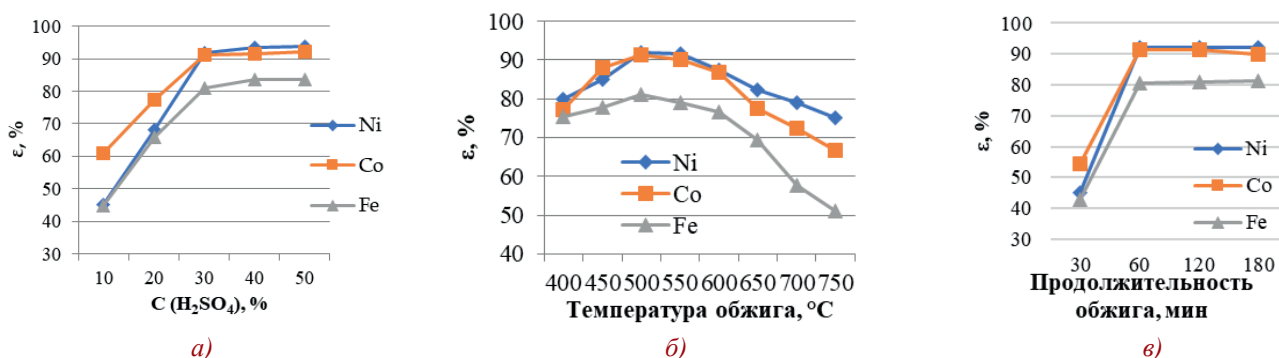


Рис. 2. Влияние параметров обжига: (а) количество серной кислоты, (б) температура обжига и (в) время обжига.

Сурет 2. Күйдіру параметрлерінің әсері: (а) күкірт қышқылының мөлшері, (б) күйдіру температурасы және (в) күйдіру ұзақтығы.

Figure 2. Effect of roasting parameters: (a) amount of sulfuric acid, (b) roasting temperature and (c) roasting duration.

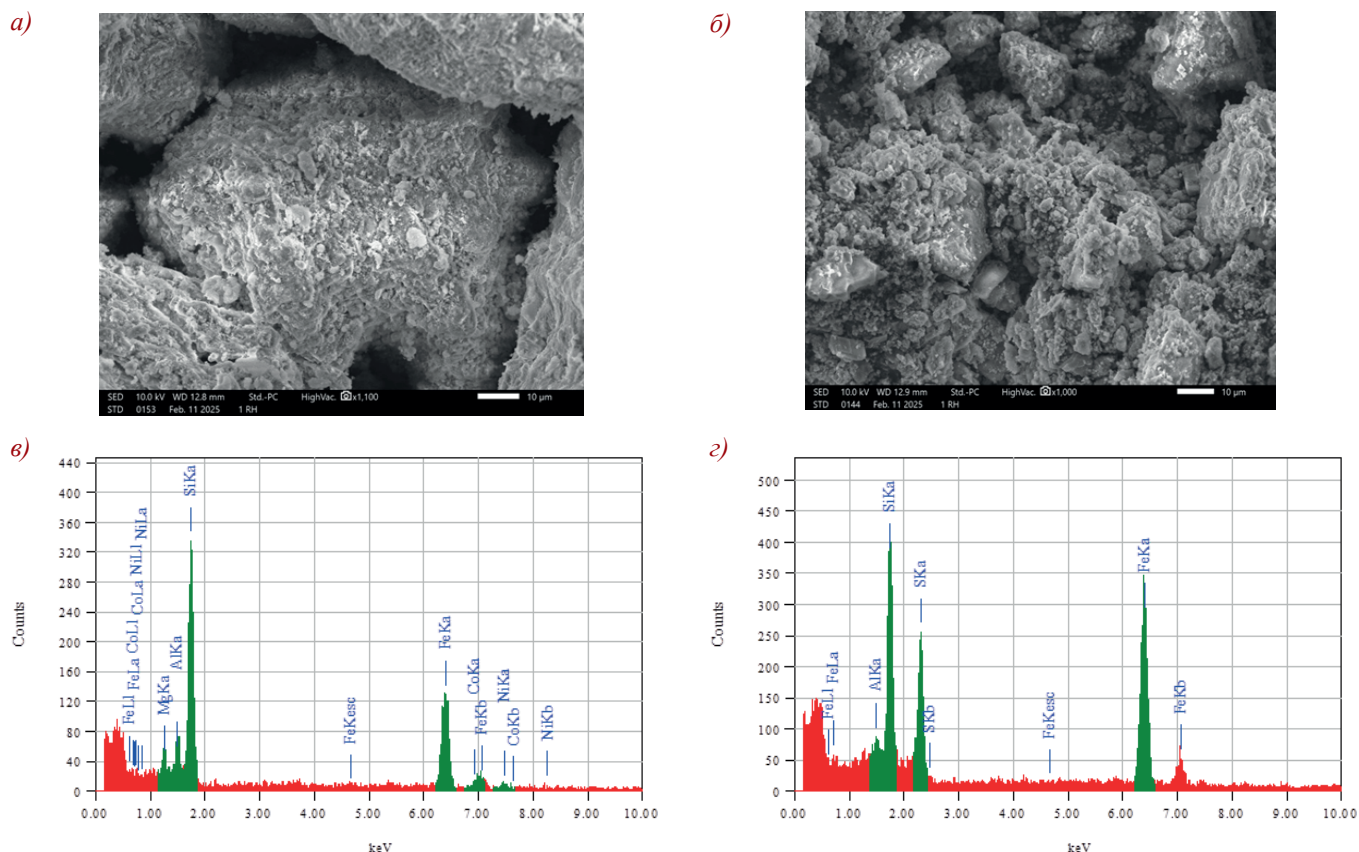


Рис. 3. Снимки СЭМ и спектры энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) исходной руды (а, в) и кека (б, д) после выщелачивания.

Сурет 3. Кеннің (а, в) және шаймалаудан кейінгі қалдықтардың (б, д) СЭМ түсірілімдері мен ЭДС спектрлері.
Figure 3. SEM images and EDS spectra of the raw ore (a, g) and cake (b, d) after leaching.

исследования кека (рис. 3б) демонстрируют кардинальные изменения микроструктуры поверхности после выщелачивания. Вместо отдельных частиц наблюдается формирование плотных, сцементированных агрегатов. Происходит дегидратация гидроксидов железа и алюминия, которая способствовала частичному спеканию и образованию более стабильных фаз. В результате наблюдается значительное снижение общей пористости и уплотнение материала.

Сравнение химического анализа составов образцов исходной руды и кека после выщелачивания по ЭДС показывает о полном переходе никеля и кобальта в продуктивный раствор. В кеке зафиксировано наличие железа, что согласуется с результатами выщелачивания – о неполном переходе железа в раствор, степень извлечения в оптимальных условиях составило не более 81%.

При водном выщелачивании огарка, полученного в этих условиях, был получен раствор с содержанием металлов $Ni = 2.33$ г/л, $Co = 0.67$ г/л, $Fe = 18,5$ г/л.

Закключение

Для переработки упорных латеритных руд применим метод «сульфатизирующий обжиг – водное выщелачи-

вание». Основными рудоносными минералами месторождения Кемпирсай являются минералы гетит, клинохлор. Содержание никеля 1.1%, кобальта 0.1%.

Для извлечения никеля, кобальта и железа оптимальными условиями сульфатизирующего обжига латеритов является температура 500 °С, концентрация серной кислоты – 25–30% (по массе) от массы руды, продолжительность обжига 60 минут. Повышение температуры от 500 °С и выше приводит к резкому снижению извлечения всех металлов. Это связано с разложением сульфатов до оксидов металлов, особенно сульфата железа до оксидов, из которых извлечение целевых металлов при водном выщелачивании сильно затрудняется. Сквозное извлечение металлов из латерита методом «сульфатизирующий обжиг – водное выщелачивание» составило $Ni = 90.12\%$, $Co = 89.52\%$, $Fe = 79.5\%$.

Благодарность

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19680477).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Обзор технологий гидрометаллургической переработки латеритных никелевых руд за последние 20 лет в мире / Мамырбаева К.К. [и др.] // Цветные металлы. 2024. С. 13–21 (на английском языке)
2. Мешрам П., Абхилаш Д., Панди Б. Расширенный обзор по извлечению никеля из первичных и вторичных источников // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2019. № 40. С. 157–193 (на английском языке)
3. Исследование возможности получения никельсодержащих ферросплавов из латеритных никелевых руд металлургическим методом / Абдирашит А. [и др.] // Металлы. 2025. № 15. С. 1–15 (на английском языке)
4. Извлечение никеля и кобальта из латеритной руды с использованием процесса карботермического восстановления с обжигом и аммиачным выщелачиванием / Ильяс С. [и др.] // Технология разделения и очистки. 2020. № 232. С. 115971 (на английском языке)
5. Бана И.С., Ван В., Шен Л. Оптимизация кислотного выщелачивания под высоким давлением для извлечения никеля и кобальта из сверхнизкосортных латеритовых руд // JOM. 2025. № 77. С. 5192–5204 (на английском языке)
6. Извлечение никеля из никелевых латеритов: процессы, ресурсы, окружающая среда и стоимость / Чжан З.Ф. [и др.] // Геология Китая. 2025. № 8. С. 187–213 (на английском языке)
7. Проблемы и перспективы обогащения никелевых латеритных руд: критический обзор / Мвине Л. // Обзор переработки полезных ископаемых и металлургического извлечения. 2024. № 45. С. 539–563 (на английском языке)
8. Переработка окисленных никелевых руд с использованием процессов спекания, обжига и выщелачивания / Иванов Н.С. [и др.] // Горная инженерия. 2022. № 181. С. 1–6 (на английском языке)
9. Двустороннее высвобождение Ni и Co в процессе предварительной обработки для повышения извлечения никеля из низкосортного никелевого латерита / Фебриана Э. [и др.] // Устойчивая горная промышленность. 2024. № 23. С. 285–298 (на английском языке)
10. Угву И.М., Шерман Д.М. Растворимость гетита со структурно включенными никелем и кобальтом: применение для латеритов // Химическая геология. 2019. № 518. С. 1–8 (на английском языке)
11. Бастуркчу Х., Ачаркан, Н. Разделение никеля и железа из латеритовой руды с использованием процесса выщелачивания-обжига-выщелачивания-осаждения // Физико-химические проблемы обогащения полезных ископаемых. 2016. № 52. С. 564–574 (на английском языке)
12. Мамырбаева К.К., Куандыкова А., Чепуштанова Т.А. Термодинамический анализ сульфатизирующего обжига залегающих никель-кобальтсодержащих отходов действующих предприятий // «Международная междисциплинарная научная конференция «Геодезия, геология и экология горного дела», SGEM», Вена, 2024. № 24. С. 151–158 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Әлемдегі соңғы 20 жылдағы латеритті никель кендерін гидрометаллургиялық өңдеу технологияларына шолу / Мамырбаева К.К. [және т. б.] // Түсті металдар. 2024. Б. 13–21 (ағылшын тілінде)
2. Мешрам П., Абхилаш Д., Пандей В. Бастапқы және қайталама көздерден никельді алу бойынша кеңейтілген шолу // Минералды өңдеу және өндіруші металлургия шолуы. 2019. № 40. Б. 157–193 (ағылшын тілінде)
3. Латериттік никель кендерінен металлургиялық әдіспен құрамында никель бар ферроқорытпаларды алу мүмкіндігін зерттеу / Әбдірашит А. [және т. б.] // Металдар. 2025. № 15. Б. 1–15 (ағылшын тілінде)
4. Латеритті кеннен никель мен кобальтты күйдіру және аммиакты шаймалау арқылы карботермиялық тотықсыздандыру процесін қолдану арқылы алу / Ильяс С. [және т. б.] // Бөлу және тазарту технологиясы. 2020. № 232. Б. 115971 (ағылшын тілінде)
5. Бана И.С., Ванг В., Шен Л. Ультратөмен сұрыпты латерит кендерінен никель мен кобальтты қалпына келтіру үшін жоғары қысымды қышқылды сілтілеуді оңтайландыру // JOM. 2025. № 77. Б. 5192–5204 (ағылшын тілінде)
6. Никельді латериттерден никельді қалпына келтіру: процестер, ресурстар, қоршаған орта және шығындар / Чжан З.Ф. [және т. б.] // Қытай геологиясы. 2025. № 8. Б. 187–213 (ағылшын тілінде)
7. Никель-латерит кендерін байыту мәселелері мен перспективалары: сыни шолу / Мвине Л. // Минералды өңдеу және металлургиялық қалпына келтіруге шолу. 2024. № 45. Б. 539–563 (ағылшын тілінде)
8. Агломерация, күйдіру және шаймалау процестерін қолданып тотыққан никель кендерін өңдеу / Иванов Н.С. [және т. б.] // Тау-кен инженериясы. 2022. № 181. Б. 1–6 (ағылшын тілінде)
9. Төмен сортты никель латеритінен никельді алуды жақсарту үшін алдын ала өңдеу кезінде Ni және Co екі жақты босату / Фебриана Е. [және т. б.] // Тұрақты тау-кен өндіру. 2024. № 23. Б. 285–298 (ағылшын тілінде)
10. Угву И.М., Шерман Д.М. Никель мен кобальттың құрылымдық қосындылары бар гетиттің ерігіштігі: латериттерге қолдану // Химиялық геология. 2019. № 518. Б. 1–8 (ағылшын тілінде)
11. Бастуркчу Х., Ашаркан Н. Латерит кенінен никель мен темірді сілтілеу-күйдіру-сілтілеу-тұндыру процесі арқылы бөлу // Минералды өңдеудің физика-химиялық мәселелері. 2016. № 52. Б. 564–574 (ағылшын тілінде)

12. Мамырбаева К.К., Куандыкова А., Чепуштанова Т.А. Жұмыс істеп тұрған кәсіпорындардың құрамында никель-кобальт бар қалдықтарды сульфаттау күйінде термодинамикалық талдау // «Маркшейдерлік геология және тау-кен экологиясын басқару, SGEM халықаралық көпсалалы ғылыми геоконференция», Вена, 2024. № 24. Б. 151–158 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Review of Technology for Hydrometallurgical Processing of Lateritic Nickel Ores over the Past 20 Years in the World / Mamyrbayeva K.K. [et al.] // *Nonferrous metals* 2024. 13–21 pp. (in English)
2. Meshram P., Abhilash D., Pandey B. Advanced Review on Extraction of Nickel from Primary and Secondary Sources // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2019. No. 40. 157–193 pp. (in English)
3. Investigation of the Possibility of Obtaining Nickel-Containing Ferroalloys from Lateritic Nickel Ores by a Metallothermic Method / Abdirashit A. [et al.] // *Metals*. 2025. No. 15. 1–15 pp. (in English)
4. Extraction of nickel and cobalt from laterite ore using a carbothermic reduction process with roasting and ammonia leaching / Ilyas S. [et al.] // *Separation and Purification Technology*. 2020. No. 232. 115971 p. (in English)
5. Bana I.S., Wang W., Shen L. Optimization of high-pressure acid leaching for nickel and cobalt extraction from ultra-low-grade laterite ores // *JOM*. 2025. No. 77. 5192–5204 pp. (in English)
6. Nickel Extraction from Nickel Laterites: Processes, Resources, Environment and Cost / Zhang, Z.F. [et al.] // *China Geology*. 2025. No. 8. 187–213 pp. (in English)
7. Challenges and Future in Ni Laterite Ore Enrichment: A Critical Review / Mweene L. [et al.] // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2024. No. 45. 539–563 pp. (in English)
8. Processing of Oxidized Nickel Ores Using Sintering, Roasting and Leaching Processes / Ivanov N.S. [et al.] // *Minerals Engineering*. 2022. No. 181. 107498 pp. (in English)
9. Double Acting Liberation of Ni and Co in the Pre-Treatment Process to Increase Recovery of Nickel from Low-Grade Nickel Laterite / Febriana E. [et al.] // *Journal of Sustainable Mining* 2024. No. 23. 285–298 pp. (in English)
10. Ugwu I.M., Sherman D.M. The Solubility of Goethite with Structurally Incorporated Nickel and Cobalt: Implication for Laterites // *Chemical Geology*. 2019. No. 518. 1–8 pp. (in English)
11. Basturkcü H., Acarkan N. Separation of Nickel and Iron from Lateritic Ore Using a Digestion – Roasting – Leaching – Precipitation Process // *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2016. No. 52. 564–574 pp. (in English)
12. Mamyrbayeva K.K., Kuandykova A., Chepushtanova T.A. Thermodynamic analysis sulfatizing roasting of stale nickel-cobalt-containing wastes from operating plants // «International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM», Vienna, 2024. No. 24. 151–158 pp. (in English)

Сведения об авторах:

Мамырбаева К.К., Ph.D, ассоц. профессор, кафедра «МиОПИ», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), k.mamyrbayeva@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-1094-5345>

Куандыкова А.Н., м. т. н., ст. преподаватель, кафедра «МиОПИ», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), a.kuandykova@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-7810-7500>

Меркібаев Е.С., Ph.D, ст. преподаватель, кафедра «МиОПИ», Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), e.merkibayev@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0003-3869-6835>

Бражендра М., профессор, директор Института обработки металлов, Вустерский политехнический институт (г. Вустер, США), bmishra@wpi.edu; <https://orcid.org/0000-0001-7897-1817>

Авторлар туралы мәліметтер:

Мамырбаева Қ.К., Ph.D, қауымдастырылған профессор, «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Куандыкова А.Н., т. ғ. м., аға оқытушы, «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Меркібаев Е.С., Ph.D, аға оқытушы, «Металлургия және пайдалы қазбаларды байыту» кафедрасы, Satbayev University (Алматы қ., Қазақстан)

Бражендра М., профессор, Металл өңдеу институтының директоры, Вустер политехникалық институты (Вустер қ., АҚШ)

Information about the authors:

Mamyrbayeva K.K., Ph.D, Associate Professor, Department of Metallurgy and Mineral Processing, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Kuandykova A.N., m. s., Senior Lecturer, Department of Metallurgy and Mineral Processing, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Merkibayev Y.S., Ph.D, Senior Lecturer, Department of Metallurgy and Mineral Processing, Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Brajendra M., Professor, Director of the Metal Processing Institute, Worcester Polytechnic Institute (Worcester, USA)