

УДК 669.054.8:621.357

Сатыбалдиев Абдымиталип Баатырбекович¹,

к.т.н., доцент

Абдыракман уулу Кутманалы²,

к.т.н., доцент

**УЛЬТРАЗВУКОВАЯ МНОГОЭЛЕКТРОДНАЯ ЭЛЕКТРО-ФИЗИЧЕСКАЯ ИОНИЗАЦИЯ
ДЛЯ ВЫСОКОЧИСТОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ,
БАЗОВЫХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ
ХВОСТОВ КЫРГЫЗСТАНА**

Сатыбалдиев Абдымиталип Баатырбекович¹,

т.и.к., доцент,

Абдыракман уулу Кутманалы²,

т.и.к., доцент

**КЫРГЫЗСТАНДЫН ТЕХНОГЕНДИК КАЛДЫКТАРЫНАН АСЫЛ,
НЕГИЗГИ ЖАНА СЕЙРЕК КЕЗДЕШУУЧУ ЖЕР МЕТАЛЛДАРЫН ЖОГОРКУ
ТАЗАЛЫКТА БӨЛҮП АЛУУ ҮЧҮН УЛЬТРАҮНДҮК КӨП ЭЛЕКТРОДДУУ
ЭЛЕКТР-ФИЗИКАЛЫК ИОНДОШТУРУУ**

Abdimalip Baatyrbekovich Satybaldyev¹,

PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor

Abdyrakman uulu Kutmanaly²,

PhD (Candidate of Technical Sciences), Associate Professor

**ULTRASONIC MULTI-ELECTRODE ELECTROPHYSICAL IONIZATION FOR HIGH-PURITY
EXTRACTION OF PRECIOUS, BASE, AND RARE-EARTH METALS
FROM KYRGYZSTAN'S TECHNOGENIC TAILINGS**

¹*Ошский технологический университет им. М. М. Адышева, Ош, Кыргызская Республика*

²*Институт природных ресурсов им. А.С. Джаманбаева ЮО НАН КР ПКР,
Ош, Кыргызская Республика*

¹*М.М. Адышев ат. Ош технологиялык университети, Ош, Кыргыз Республикасы*

²*КРП КР УИА ТБ А.С. Джаманбаев ат. Жаратылыш байлыктары институту, Ош,
Кыргыз Республикасы*

¹*Osh Technological University named after M.M. Adyshev, Osh, Kyrgyz Republic*

²*Institute of Natural resources named after A.S. Dzhamanbayev SB NAS KR PKR,
Osh, Kyrgyz Republik*

Аннотация. Предложена оригинальная, многокомпонентная технология экстракции благородных, базовых и редкоземельных элементов из техногенных отходов Кыргызстана, в основе которой — электро-физическая ионизация (ЭФИ), дополненная кавитационно-активируемым ультразвуком и реализованная в пространственно распределённой многоэлектродной схеме. Исследование преследовало двуединую цель: (i) сформулировать физико-химическое обоснование процессов, обеспечивающих предельную селективность и высокую энергетическую рентабельность, и одновременно (ii) смоделировать режимы, минимизирующие генерацию вторичных загрязнителей. В качестве исходного сырья анализировались хвосты обогатительных фабрик, металлургические шлаки и шламы, аккумулированные в ключевых горнопромышленных провинциях страны.

Экспериментальная программа, построенная на методологии поверхности отклика, позволила «тонко подстроить» критические параметры: потенциал 6 – 12 В, межэлектродный зазор 1,0 – 1,5 см, молярность электролита 0,5 – 1 М, акустическая мощность < 300 Вт, продолжительность обработки 30 – 65 мин. Итог — рекордные коэффициенты извлечения: Cu — 96,8 %, Zn — 93,5 %, Ag — 92,1 %, Au — 88,5 %; для редкоземельных представителей La и Nd соответствующие значения достигли 79,7 % и 81,1 %. Чистота полученных осадков, верифицированная комплексом ICP-OES / SEM-EDX, превысила 99,8 ‰ (Cu) и 99,5 ‰ (Au, Ag).

Синергия ультразвуковой кавитации и многоэлектродного поля снижает энергетический барьер электрохимических реакций, дезагрегирует твёрдую фазу, ускоряет массоперенос, а равномерное распределение тока препятствует пассивации анодов. Сопоставление с классическими гидро- и пирометаллургическими маршрутами выявило существенное (кратно-десятковое) сокращение энергопотребления при полном отказе от опасных реагентов. Разработанный подход не только открывает дорогу комплексной утилизации накопленных отходов, сокращая экологические риски, но и формирует альтернативную минерально-сырьевую базу критически значимых металлов, способную придать дополнительный импульс экономике Кыргызской Республики.

Ключевые слова: электро-физическая ионизация, ультразвуковая активация, промышленные отходы, извлечение металлов, редкоземельные элементы, оптимизация процесса, экологическая безопасность.

Аннотация. Кыргызстандын техногендик калдыктарынан асыл, негизги жана сейрек кездешүүчү жер элементтерин бөлүп алуу үчүн оригиналдуу, көп компоненттүү технология сунушталган. Анын негизин кавитация менен активдештирилген ультраун менен толукталган жана мейкиндикте бөлүштүрүлгөн көп электроддуу схемада ишке ашырылган электр-физикалык иондоштуруу (ЭФИ) түзөт. Изилдөө эки бирдиктүү максатты көздөгөн: (i) эң жогорку деңгээлдеги тандалмалуулукту (селективдүүлүктү) жана жогорку энергетикалык рентабелдүүлүктү камсыз кылган процесстердин физика-химиялык негиздемесин иштеп чыгуу, жана ошону менен бирге (ii) экинчилик булгоочу заттардын пайда болушун минималдаштыруучу режимдерди моделдөө. Баштапкы чийки зат катары өлкөнүн негизги тоо-кен өнөр жай аймактарында топтолгон байытуучу фабрикалардын калдыктары, металлургиялык шлактар жана шламдар талданган.

Жооп кайтаруу беттик методологиясына негизделген эксперименталдык программа критикалык параметрлерди: потенциалды 6 – 12 В, электроддор аралык ажырымды 1,0 – 1,5 см, электролиттин молярдуулугун 0,5 – 1 М, акустикалык кубаттуулукту < 300 Вт, иштетүү узактыгын 30 – 65 мүн. чегинде так кылдат жөндөөгө мүмкүндүк берди. Натыйжада, бөлүп алуунун рекордук коэффициенттерине жетишилди: Cu — 96,8 %, Zn — 93,5 %, Ag — 92,1 %, Au — 88,5 %; сейрек кездешүүчү жер элементтеринин өкүлдөрү La жана Nd үчүн тиешелүү көрсөткүчтөр 79,7 % жана 81,1 % түздү. ICP-OES / SEM-EDX комплекси менен тастыкталган алынган чөкмөлөрдүн тазалыгы Cu үчүн 99,8 ‰ жана Au, Ag үчүн 99,5 ‰ ашты.

Ультраун кавитациясынын жана көп электроддуу талаанын синергиясы электрохимиялык реакциялардын энергетикалык тоскоолдугун төмөндөтөт, катуу фазаны дезагрегациялайт, масса алмашууну тездетет, ал эми токтун бир калыпта бөлүштүрүлүшү аноддордун пассивациясына жол бербейт. Классикалык гидро- жана пирометаллургиялык ыкмалар менен салыштыруу, кооптуу реагенттерден толук баш тартуу менен энергия керектөөнүн олуттуу (бир нече эсе жана ондогон эсе) кыскарганын көрсөттү. Иштелип чыккан бул ыкма экологиялык тобокелдиктерди азайтуу менен топтолгон калдыктарды комплекстүү утилизациялоого жол ачып гана койбостон, Кыргыз Республикасынын экономикасына кошумча түрткү берүүгө жөндөмдүү болгон критикалык маанилүү металлдардын альтернативдүү минералдык-чийки зат базасын түзөт.

Негизги сөздөр: электр-физикалык иондоштуруу, ультраун менен активдештирүү, өнөр жай калдыктары, металлдарды бөлүп алуу, сейрек кездешүүчү жер элементтери, процессти оптималдаштыруу, экологиялык коопсуздук.

Abstract. An original, multicomponent technology is proposed for extracting precious, base, and rare-earth elements from Kyrgyzstan's technogenic wastes. The core of the process is electro-physical ionisation (EPI) enhanced by cavitation-assisted ultrasound and implemented in a spatially distributed multi-electrode configuration. The study pursued a dual objective: (i) to formulate the physico-chemical rationale that ensures maximal selectivity and high energy efficiency, and (ii) to model operating regimes that minimise the generation of secondary pollutants. Feedstocks included concentrator tailings, metallurgical slags, and sludges accumulated in the country's key mining provinces.

A response-surface experimental design enabled fine-tuning of the critical parameters: potential 6–12 V, inter-electrode gap 1.0–1.5 cm, electrolyte molarity 0.5–1 M, acoustic power < 300 W, and treatment duration 30–65 min. The result was record extraction efficiencies: Cu — 96.8 %, Zn — 93.5 %, Ag — 92.1 %, Au — 88.5 %. For the rare-earth representatives, La and Nd, the respective values reached 79.7 % and 81.1 %. The purity of the recovered precipitates, verified by combined ICP-OES / SEM-EDX analysis, exceeded 99.8 ‰ (Cu) and 99.5 ‰ (Au, Ag).

The synergy of ultrasonic cavitation and the multi-electrode field lowers the energetic barrier of electrochemical reactions, disaggregates the solid phase, accelerates mass transfer, and ensures uniform current distribution, thus preventing anode passivation. Comparison with conventional hydro- and pyrometallurgical routes revealed an order-of-magnitude reduction in energy consumption and complete elimination of hazardous reagents. The developed approach not only paves the way for comprehensive recycling of accumulated wastes—mitigating environmental risks—but also establishes an alternative mineral resource base for critical metals, capable of providing an additional impetus to the economy of the Kyrgyz Republic.

Keywords: electro-physical ionisation; ultrasonic activation; industrial wastes; metal extraction; rare-earth elements; process optimisation; environmental safety.

Введение

Глобальная эко-технологическая гонка за последнюю четверть века развернула поистине беспрецедентную экспансию потребления металлов. Индустриализация развивающихся экономик, всемирная цифровизация и амбициозный курс на «зелёный» переход сплелись в тугой узел спроса, в результате чего содержание ценных элементов в извлекаемых рудах неумолимо падает, а природные месторождения стремительно беднеют. Мир, растущий на металле, погружается в парадокс: чем больше он добывает, тем больше производит отходов, и тем острее ощущает дефицит первичного сырья. Горно-рудный и металлургический сектора, формируя миллиардные тонны побочных продуктов ежегодно, уже сейчас входят в тройку крупнейших источников промышленных отходов. Вклад металлургии в планетарный углеродный след внушителен: порядка 40 % всех промышленных выбросов парниковых газов и почти десятая часть мировой электроэнергии приходится именно на этот цикл. Ежегодная добыча приблизилась к 3,2 млрд т минералов, однако сопутствующие хвосты и шламы превосходят массу готового металла

в 15–20 раз, причём прогнозы сулят удвоение этих масштабов к 2050 г. — тревожный сигнал для климата, биоразнообразия и человеческого здоровья [1–3].

На этом фоне концепция циркулярной экономики уже не выглядит академической абстракцией; напротив, она перерождается в стратегический императив. Идея замкнутого потока «ресурс → продукт → отход → новый ресурс» смещает акцент с экстенсивного освоения недр на интенсивную переработку техногенных запасов. Извлечение металлов из промышленных отходов, по сути, совмещает в себе две синергетические выгоды: сокращение экологического ущерба и рождение дополнительных экономических ниш. Показателен лишь один пример: рециклинг алюминия уменьшает энергозатраты примерно на 95 % по сравнению с первичным электролизом боксита. Но даже столь внушительные цифры не перекрывают разрыв между аппетитом глобального рынка и объёмом доступного лома: сегодня вторичное сырьё, по оценкам, покрывает не более трети спроса. Следовательно, какая-то часть металлов неизбежно будет поступать из рудников, а значит, максимальное вовлече-

ние всех техногенных источников, включая хвостохранилища и шламоотвалы, перестаёт быть факультативной «зелёной» мерой и становится краеугольным условием ресурсной безопасности [4].

Особое место в этом уравнении занимают критические металлы — прежде всего редкоземельные элементы (РЗЭ), чья роль в электронике, электромобилях и модернизации энергосистем сопоставима с ролью нефти для индустриального века. При этом коэффициент их переработки удручающе низок: менее 1 %, тогда как для базовых цветных металлов диапазон колеблется от 30 до 70 %. Производство же «первичных» РЗЭ демонстрирует рекордные значения удельных выбросов CO₂ на килограмм продукта. Учитывая, что свыше 60 % добычи и 90 % переработки РЗЭ сосредоточено в Китае, любые торговые ограничения моментально трансформируются в глобальный шок. Отсюда вытекает двойная задача — не только найти эффективные, экологически щадящие методики рекстракции РЗЭ из техногенных потоков, но и тем самым снизить геополитические риски, кардинально укрепив устойчивость цепочек поставок [5].

В этом контексте кейс Кыргызской Республики раскрывает проблему с особой наглядностью. Богатая минеральными ресурсами страна наследует одновременно и бремя многолетней добычи: порядка 100 млн т производственных и бытовых отходов уже аккумулировано на ограниченной территории. Горнодобывающая ветвь формирует львиную долю — это 35 хвостохранилищ и 25 горных отвалов, рассеянных по всей республике. Ежегодный прирост токсичных техногенных масс лишь усиливает нагрузку на экосистемы и подталкивает к поиску технологических решений, способных превратить этот «потенциальный экологический долг» в стратегический резерв ценных и редких металлов.

Так, между императивом глобальной устойчивости и региональными вызовами выстраивается цепочка необходимости: чем отчётливее мир осознаёт пределы традиционной добычи, тем активнее обращается к запасам, уже лежащим у него под ногами — в хвостах, шламах, шлаках и золе. Эффективная и экологически выверенная технология

извлечения металлов из этих потоков становится не просто технологической инновацией, а ключевым звеном в архитектуре будущей металлургии, где отход перестаёт быть конечной точкой, а превращается в новую точку отсчёта.

Крупнейшие промышленные рудники Кыргызстана — Кумтор, Талдыбулак-Левобережный, Терек-Сай — в последние десятилетия породили настоящий «ледник» техногенных отходов, неуклонно надвигающийся на экономику и экологию страны. Кумтор, например, только в 2022 году добыл 17 305 кг золота, опираясь на ресурсную базу, которая на декабрь 2020-го оценивалась в 73,3 млн т руды со средним содержанием 2,66 г/т Au. Каждая тонна такой руды, пройдя через фабрику, оставляет после себя хвосты, где по-прежнему «сидят» значительные количества металлов. Не отстаёт и Терек-Сай: в 2020 году здесь стартовало строительство собственной обогатительной фабрики и нового хвостохранилища — ещё один сигнал о грядущем росте накопленных отходов. Запрет, введённый в 2022-м на экспорт лома и хвостов чёрных металлов, а также золотосодержащих концентратов, красноречиво показывает: республика стремится удерживать ресурсы внутри страны, выжимая из них максимальную добавленную стоимость и уходя от привычной модели сырьевого экспорта [6].

Однако технологический «след» горнодобычи далеко не безобиден. Значительная доля tailings storage facilities (TSF) давно утратила либо проектный срок службы, либо элементарное соответствие современным санитарным нормам, превращаясь в пороховые бочки. История уже предъявляла счёт за небрежность. В 1998 году на Кумторе автотранспортная цистерна, сорвавшись с горной дороги, обрушила в реку Барскаун более тонны цианида; от острого отравления пострадали свыше 2 500 человек. Ещё более трагичный эпизод разворачивался в 1958-м: вследствие землетрясения и проливных дождей хвостохранилище № 7 комбината Майлы-Суу разорвало, выплеснув 600 000 м³ радиоактивной пульпы, которая «прошла» реку на сорок километров вниз по течению, убивая скот и подвергая людей облучению. Прошли десятилетия, а уровень

урана в водах Майлы-Суу всё ещё превышает фон в 10–15 раз. Добавьте к этому высокий сейсмотектонический режим региона, рыхлые склоны, лавино-селевую активность — получаем классическую картину каскадных рисков. Даже бассейн Иссык-Куля, куда туристы едут за «лечебной» водой, фиксирует в реках повышенные концентрации Cr и As антропогенного происхождения, что заложило мину замедленного действия под здоровье местных жителей [7].

На этом фоне стратегическая логика переработки техногенных запасов становится безальтернативной. Открытая добыча на Кумторе официально прекращается в 2023-м, а полный цикл переработки руды завершится к 2031 году; значит, традиционный поток первичного сырья пойдёт на убыль. Одновременно государство всё громче заявляет о намерении развивать редкоземельную минеральную базу, ведь РЗЭ критичны для «зелёных» и высоких технологий. Следовательно, объём отходов, потенциально содержащих Y, Nd или La, лишь вырастет — и вовлечение этих «вторичных рудников» в оборот превращается из экологической повинности в экономическую возможность. Иными словами, правильно организованный «горный ренессанс» способен не только продлить жизнь горнодобывающей отрасли Киргизии, но и конвертировать наследство индустриальной эры в точку роста будущей экономики.

Извлечение ценных и критически важных металлов из промышленных отходов — особенно когда речь идёт о разбавленных растворах с концентрациями на уровне единиц–десятков ppm и о гетерогенных матрицах, насыщенных сопутствующими компонентами, — остаётся серьёзной технологической головоломкой. Классические гидрометаллургические подходы (ионный обмен, экстракция растворителями) надёжно работают при высоких содержаниях целевых элементов, однако при переходе к «разреженным» системам их эффективность резко падает: удельные энергозатраты возрастают, селективность снижается, а стоимость получаемого продукта становится экономически неоправданной. Дополнительную сложность вносят повышенные концентрации Fe^{3+} и Al^{3+} , способные маскировать аналитический

сигнал или формировать устойчивые комплексные соединения, блокирующие каталитически активные центры сорбентов.

Отчасти ситуацию призваны исправить ионные жидкости, позиционируемые как «зелёные» растворители нового поколения. Тем не менее ионики нередко подвержены термической и электрохимической деградации; более того, вследствие высокой сольватационной способности они способны мигрировать во вторичную водную фазу, тем самым усложняя пост-очистку. Возникает необходимость принципиально иных решений, сочетающих точный процесс-контроль, умеренное энергопотребление и минимальный экологический след.

Электрохимические технологии, являясь логичным развитием концепции ионного извлечения, в теории отвечают указанным критериям: трансфер заряда задаётся потенциалом электрода, расход реагентов близок к нулю, а побочные продукты сведены к минимуму. На практике же всё не столь однозначно. Во-первых, состав сточных вод редко известен «до последнего иона», что затрудняет настройку потенциодинамического режима. Во-вторых, органические лиганды, обильно присутствующие в технологических растворах, формируют прочные хелаты с Cu^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} и REE^{3+} , из-за чего электроосаждение протекает медленно и требует повышенных плотностей тока. Ограничения массопереноса, коррозия электрода и банальное масштабирование ячеек до промышленных объёмов лишь усугубляют проблему.

Для преодоления этих барьеров предлагается электро-физическая ионизация (ЭФИ) в многоэлектродной конфигурации, дополнительно «подстёгиваемая» ультразвуковой кавитацией. Кавитационные микро-струи и ударные волны дезагрегируют твёрдую фазу, снимают диффузионные ограничения и способствуют быстрому обновлению приграничного слоя, тем самым повышая массоперенос и, как следствие, выход целевых металлов [3, 4].

Цель исследования — создать научно обоснованную, технологически адаптируемую методику извлечения Au, Ag, Cu, Ni, Zn, Mg, Ca, а также редкоземельных La и Nd из техногенных отходов ключевых горнопромышленных зон Кыргызстана посредством

ЭФИ, усиленной ультразвуковой активацией.

Ключевые задачи, решаемые в работе

1. Инвентаризация сырьевой базы.

Провести детальный геохимический аудит хвостов, шламов и шлаков, оценить распределение и прогнозные запасы указанных элементов в различных регио-геологических провинциях страны.

2. Инженерная разработка. Спроектировать лабораторную установку ЭФИ с оптически прозрачной реакторной камерой, интегрированным ультразвуковым модулем и регулируемым межэлектродным расстоянием; построить математическую модель совмещённого переноса заряда и массы в системе «твёрдое тело / жидкость / электрод».

3. Параметрическая оптимизация. Используя дизайн эксперимента (Taguchi, RSM), выявить оптимальные комбинации напряжения, интервала между электродами, концентрации электролита, частоты/мощности УЗ-облучения и времени экспозиции, обеспечивающие максимальный выход при минимальной удельной энергии.

4. Экспериментальная верификация. Оценить кинетику и выход продуктов методом ICP-OES, морфологию и фазовый состав осадка — SEM/EDX, сопоставить энергопотребление и селективность с традиционными схемами.

5. Техничко-экономическое сравнение. Сравнить ЭФИ с пирометаллургией и классической гидрометаллургией по критериям CAPEX/OPEX, углеродному следу и ресурсной устойчивости.

6. Масштабирование. Проанализировать переход от лабораторной ячейки к пилотному модулю: выбор коррозионно-стойких электродных материалов, интеграция возобновляемых источников энергии, разработка схемы замкнутого водо-реагентного цикла.

Тем самым формируется комплексная научно-производственная дорожная карта, направленная на превращение проблемных отходов в устойчивый источник стратегических металлов и — в более широком смысле — на укрепление экономики замкнутого цикла в Кыргызской Республике.

Материалы и методы

В контексте данного исследования объектами ресурсного извлечения выступают

наиболее типовые, но при этом чрезвычайно разнообразные промышленные отходы, накопившиеся вследствие горнодобывающих и перерабатывающих операций на территории Кыргызской Республики. Кратко перечислим их — хотя каждая категория заслуживает отдельной монографии.

1. Рудные хвосты. Эти тонкодисперсные «хвосты», образующиеся после обогащения золотосодержащих, полиметаллических либо медно-порфировых руд, на первый взгляд напоминают безобидную смесь песка, ила и глины. Однако под микроскопом они раскрываются как многофазная система, где остаточные благородные и переходные металлы соседствуют с реагентами флотации, сульфидными соединениями и иными химическими «привидениями» технологического цикла. Опасность хвостохранилищ двойственна: с одной стороны, это потенциальный «клад» недоэкстрагированных металлов; с другой — источник тяжелых элементов, склонных к бионакоплению и долголетней миграции в экосистемах.

2. Промышленные шламы. Категория включает в себя всё — от углеобогачительных осадков до гальванических и сточных шламов, отягощённых медью, никелем, цинком, хромом и их многочисленными оксидно-карбонатными модификациями. Особенно показателен пример гальванических отходов: высокая концентрация легко выщелачиваемых металлов превращает такие шламы в «химическую гранату» замедленного действия, готовую при малейшем нарушении изоляции отравить подземные воды. Фракционный состав (карбонатная, остаточная, Fe-Mn-оксидная фракции) предопределяет сложную кинетику выщелачивания и, следовательно, требует тонкой настройки экстракционных технологий.

3. Металлургические шлаки. Побочные продукты высокотемпературных переделов — например, сталеплавильные шлаки — давно перестали быть просто «камнем под ногами» металлурга. Они содержат отчётливую подпись базового сырья: в шлаках нержавеющей стали концентрируется шестивалентный хром, в ферросплавах — марганец и ванадий. Но ценность идёт рука об руку с токсичностью, что осложняет возвращение шлаков в хозяйственный оборот и делает их

одновременной экологической проблемой и ресурсом.

Почему именно эти отходы? По совокупным запасам, подтверждённому содержанию целевых металлов и масштабу экологического риска именно хвосты, шламы и шлаки занимают «тройку лидеров» среди промышленных накопителей Кыргызстана. Их многокомпонентная природа, переменная минералогия и чередование ценных и ядовитых фаз создают вызов, на который классические методы гидро- и пирометаллургии отвечают лишь частично. Инновационные технологии электро-физической ионизации (ЭФИ) способны, как ожидается, одновременно решать двойственную задачу: извлекать металлы с высокой селективностью и параллельно обезвреживать матрицу.

Географический фокус. Для экспериментальной апробации ЭФИ выделены три ключевых региона, аккумулирующих наибольшие объёмы упомянутых отходов:

- Ошская область — южный индустриальный узел с хвостохранилищами золотодобычи и углеобогащения;
- Джалал-Абадская область — исторический «щит» полиметаллических производств;
- Иссык-Кульская область — северо-восточный кластер медно-порфировых кампаний.

Такое региональное «трио» позволяет показать потенциал ЭФИ на разных типах матриц и в различных климатогеологических условиях, а значит, сформировать непротиворечивую методологическую базу для масштабирования технологии по всей республике.

Таблица 1 – Расположение промышленных отходов и содержание металлов [7]

Область	Тип отходов	Запас, млн т	Au, г/т	Ag, г/т	Cu, %	Ni, %	Zn, %	Mg, %	Ca, %	La, г/т	Nd, г/т
Ошская	Шламы углеобогащения	5,2	0,8	12,5	0,15	0,08	0,22	1,5	2,1	35	28
Джалал-Абадская	Полиметаллические хвосты	8,7	0,9	18,0	0,25	0,12	0,35	1,8	2,5	40	32
Иссык-Кульская	Отходы обогатительной фабрики	3,3	2,4	35,0	0,40	0,15	0,50	2,0	2,8	50	40
Нарынская	Хвосты золоторудных месторождений	6,1	1,1	20,0	0,10	0,05	0,18	1,2	1,8	30	25
Чуйская	Промышленные шламы (гальванические)	1,5	0,01	0,5	0,80	0,60	1,20	0,5	0,7	5	4

Представленные в исследовании сведения недвусмысленно свидетельствуют: техногенные накопители Кыргызстана скрывают внушительные кластеры стратегически значимых металлов. Так, хвостохранилище крупнейшего в стране золотодобывающего предприятия — рудника Кумтор, раскинувшегося в суровом высокогорье Иссык-Куля,— после переработки руды всё ещё

удерживает остаточные фракции золота и серебра, «растворённые» в минеральной матрице отвалов. Далее на юго-западном направлении, в Джалал-Абадской области, массивные полиметаллические хвосты хранят медь, никель и цинк, формируя потенциально доходную сырьевую «подушку» для будущих извлечений. Даже, казалось бы, непригодные шламы углеобогащения в Ошском

регионе — продукт далёкий от классической цветной металлургии — при детальном анализе обнаруживают как заметную долю щелочноземельных элементов, так и примесь редкоземельных металлов (РЗМ).

Особого внимания заслуживает включение лантана и неодима в перечень целевых элементов. Их выбор обусловлен не только взрывным ростом мирового спроса на РЗМ, но и сугубо национальным контекстом: Правительство Кыргызской Республики объявило о планах стимуляции разведки редкоземельных проявлений на своей территории. Пусть детальные количественные оценки La и Nd в местных техногенных отложениях пока фрагментарны, однако прецеденты соседних стран внушают оптимизм. Так, открытое в Казахстане месторождение, богатое цериевой, лантановой и неодимовой минерализацией, наглядно демонстрирует геологическую «родственность» региона, тем самым верифицируя обоснованность расширенного исследовательского фокуса [7–9].

Для эффективного освоения столь гетерогенных источников предлагается принципиально новая архитектура извлечения — электро-физическая ионизация (ЭФИ), дополненная ультразвуковой активацией в многоэлектродной конфигурации. Синергетика двух физических воздействий служит «прорывным мостом» через извечные барьеры классических методов: низкую селективность в разбавленных растворах, заторможенный массоперенос в вязко-гранулированных суспензиях и, наконец, генерацию токсичных вторичных фаз.

Экспериментальный «скелет» процесса очерчен следующими опорными параметрами. Во-первых, рабочее напряжение 6–12 В — коридор, в котором с одной стороны гарантируется запуск электрохимических реакций, а с другой не допускается чрезмерный рост энергетических издержек. Во-вторых, межэлектродный зазор 1,0–1,5 см; именно такая дистанция поддерживает оптимальный градиент поля, регулирующий траектории ионных потоков. В-третьих, электролитическая среда 0,5–1 М (NaCl, либо слабые кислоты) — компромисс между проводимостью, скоростью ионизации и селективностью осаждения [10, 11].

Физико-химическая подоплёка ЭФИ мно-

гоступенчата. Под действием электрического поля в неоднородной суспензии проявляются электроосмос и электромиграция: жидкая фаза, словно втянутая невидимой перистальтикой, перемещается к катоду, тогда как заряженные ионы устремляются к противоположно заряженным электродам. Одновременно электролиз воды продуцирует на аноде H^+ -ионы, а на катоде — OH^- -группы, вычерчивая по всему объёму градиент pH. Кислотная фронтальная зона, смещаясь, десорбирует тяжёлые металлы с твердофазной поверхности частиц, повышая их растворимость и, соответственно, подвижность [12, 13].

Ключевая инновация — внедрение ультразвука в многоэлектродную ячейку. Кавитационные микровзрывы, порождаемые акустическими волнами, разбивают агломераты, увеличивают площадь контакта твёрдой и жидкой фаз, а также создают турбулентные микросмешения, тем самым многократно ускоряя массоперенос и снижая диффузионные ограничения. В совокупности электрическое и ультразвуковое воздействие формируют высокоадаптивную технологическую платформу, способную «выжимать» из техногенных залежей ту самую «скрытую» ценность, которая ранее казалась недостижимой.

Чтобы нивелировать врождённые недостатки электро-физической ионизации (ЭФИ) — прежде всего ограниченную скорость массопереноса в гетерогенных системах и пассивацию электродных поверхностей — предлагается радикально модернизировать реактор, объединив два взаимодополняющих инженерных решения: многоэлектродную конфигурацию и ультразвуковую активацию.

1. Многоэлектродная архитектура.

Переход от классической пары электродов к пространственно продуманной решётке катодов-анодов (часто в цилиндрическом исполнении) многократно увеличивает суммарную рабочую площадь. В результате:

- **Плотность тока на единицу площади падает**, что уменьшает поляризационные явления и тормозит зарастание катодной зоны металлом.

- **Электрическое поле распределяется равномернее** во всём объёме суспензии,

исключая «мёртвые» зоны и повышая добычу редких металлов.

- **Параллельное извлечение нескольких элементов** становится технологически достижимым, а рекуперация части энергии (например, через токи короткозамкнутых контуров) улучшает экономику процесса [14–16].

Такая модульная схема легко масштабируется, причём переконфигурация расстояний между электродами позволяет подстраиваться под состав отходов, степень электропроводности и требуемую селективность.

2. Ультразвуковая активация. Введение акустического поля (20–100 кГц, ≤ 300 Вт) преобразует реакционный объём в динамичную кавитационную среду. Коллапс микропузырьков порождает локальные импульсы давления и температуры, которые:

- **Фрагментируют твёрдые частицы:** диаметр шлаковых агломератов способен уменьшиться с ~ 30 мкм до ~ 1 мкм, что снижает диффузионные барьеры.

- **Очищают и «разгерметизируют» поверхность,** высвобождая инкапсулированные ионы и кратно увеличивая площадь фазового контакта.

- **Ускоряют массоперенос:** высокоскоростные микроструи стирают диффузионный слой, нивелируя главную кинетическую «узкую горловину» электрохимической схемы [17–19].

- **Снижают энергию активации электрохимических реакций** (переход от 34,68 кДж/моль к 6,21 кДж/моль зафиксирован в модельных опытах), тем самым драматически увеличивая скорость выщелачивания.

- **Вызывают электропорацию органических включений,** если последние присутствуют, облегчая высвобождение металлов, связанных биогенными матрицами [20–22].

Синергия этих двух нововведений формирует реактор нового поколения: ток распределяется мягко, пассивация подавляется механически-акустическим режимом, а массоперенос выходит за пределы диффузионных ограничений. В итоге коэффициент извлечения целевых элементов растёт, энергоёмкость падает, а экологическая нагрузка

на последующую очистку стоков снижается за счёт более полной селективной депонизации металлов.

Многоуровневая взаимодополняемость ультразвуковой обработки и многоэлектродной конфигурации проявляется в том, что акустические колебания, проникая в толщу рабочего раствора, рассекают агломераты твёрдой фазы, интенсифицируют диффузионный перенос и, образно говоря, «раскрывают» металлсодержащие микрониты, тогда как пространственно распределённые электроды, формируя неоднородное, но контролируемое поле, ускоряют межфазные электрохимические превращения и локально снижают перенапряжения на активных участках. Совместное действие этих факторов трансформирует кинетику извлечения: целевые ионы высвобождаются и депонируются заметно быстрее, позволяя достичь повышенных степеней извлечения при сокращённой продолжительности цикла и ощутимо меньшем энергетическом «следе» [20].

Для картирования оптимального «ландшафта» параметров в технологии ЭФИ, объединяющей ультразвуковую активацию с многоэлектродной системой, целесообразно прибегнуть к инструментарию робастного планирования эксперимента — будь то ортогональные матрицы Тагути либо более гибкая методология поверхности отклика (Response Surface Methodology, RSM). Оба статистических подхода позволяют без избыточного количества испытаний вскрыть, количественно оценить и визуализировать вклад ключевых переменных — напряжения, межэлектродного интервала, концентрации электролита, мощности и частоты ультразвука, а также времени экспозиции — не только в выход и химическую чистоту целевых металлов, но и в суммарное энергопотребление установки. При этом техника Тагути, минимизируя число прогонов, обеспечивает получение структурно стойкого («робастного») режима для многокритериальной задачи извлечения ряда металлов, тогда как RSM, разворачивая многофакторное пространство в наглядную поверхность, облегчает поиск синергетических «седловых точек» и анализ перекрёстных эффектов параметров [21, 22].

Результаты

Применение новой концепции электро-физической ионизации (ЭФИ), усиленной ультразвуковой активацией в многоэлектродной системе, демонстрирует значительное повышение эффективности извлечения ценных металлов из промыш-

ленных отходов Кыргызской Республики. Синергетическое воздействие электрического поля, оптимизированной геометрии электродов и ультразвуковой кавитации обеспечивает беспрецедентную мобилизацию и селективное извлечение металлов из сложных матриц.

Таблица 2 – Результаты оптимизации параметров ЭФИ и эффективность извлечения металлов

Металл	Оптимальное Напряжение, В	Оптимальное Межэлектродное Расстояние, см	Оптимальная Концентрация Электролита, М	Оптимальная Мощность Ультразвука, Вт	Время Обработки, мин	Эффективность Извлечения, %
Au	8	1,2	0,7	250	45	88,5
Ag	7,5	1,1	0,6	220	40	92,1
Cu	9	1,0	0,8	280	30	96,8
Ni	10	1,3	0,9	260	50	91,2
Zn	8,5	1,2	0,7	240	35	93,5
Mg	11	1,4	1,0	200	60	82,3
Ca	12	1,5	1,0	180	65	78,9
La	9,5	1,0	0,8	300	55	79,7
Nd	9,5	1,0	0,8	300	55	81,1

Итоговые значения, представленные во второй таблице, получены после скрупулёзной оптимизации параметров процесса методом поверхности отклика (RSM) и наглядно демонстрируют, что даже сложная многофазная матрица промышленного отхода поддаётся почти предельному размыву ионов. Так, медь (Cu) удаётся извлекать с эффективностью 96,8 % — показатель, зачастую недостижимый для традиционных гидро- и пирометаллургических технологий. Благородные металлы тоже проявляют завидную

«уступчивость»: золото (Au) фиксируется на отметке 88,5 %, серебро (Ag) — 92,1 %, что как минимум сопоставимо, а нередко и превосходит результаты альтернативных электрохимических схем, применяемых к вторичному сырью. Не менее примечательны цифры для стратегически значимых редкоземельных элементов: лантана (La) — 79,7 % и неодима (Nd) — 81,1 %. На фоне общемировых трудностей с их рециклингом подобные величины выглядят более чем обнадеживающе [23–26].



Рисунок 1. Эффективность извлечения металлов методом ЭФИ с ультразвуковой активацией

Для наглядной демонстрации селективности и комплексной результативности ЭФИ, усиленной ультразвуковой кавитацией, построен суммарный график 1, отражающий доли извлечения каждого исследуемого элемента.

Кривая на графике, подобно бурному рельефу горного хребта, то стремительно взмывает вверх, то плавно снижается, следуя за термодинамикой и электрохимической природой самих металлов. Выше всех «вершин» поднимаются медь (96,8 %), цинк (93,5 %) и серебро (92,1 %) — фактор, обусловленный их высокой электропроводностью, склонностью к активному растворению в кислой среде и эффективной турбулизацией поверхностей благодаря ультразвуковым микропотокам. Золото, хоть и «благородно» инертно, тем не менее преодолевает рубеж 88 %, подтверждая универсальность методики.

Сдержаннее, но вполне достойно ведут себя редкоземельные и щелочноземельные представители: лантан (79,7 %), неодим (81,1 %), магний (82,3 %) и кальций (78,9 %). Для первых двух столь высокий результат особенно значим ввиду их традиционной «упрямости» при селективном выщелачивании; для вторых — подчёркивает гибкость ЭФИ при работе с катионами, радикально отличающимися по радиусу гидратации и потенциалу разряда.

Таким образом, совокупность полученных данных позволяет утверждать: электрофизическая ионизация, дополненная ультразвуковой активацией, формирует технологическую платформу, одинаково результативную для базовых, благородных, редкоземельных и щелочноземельных металлов, открывая путь к глубокому и экологически обоснованному освоению техногенных ресурсных потоков.

Наблюдаемые рекордные коэффициенты извлечения обусловлены не единственным, а целым каскадом взаимосвязанных эффектов, заложенных в конструкцию рассматриваемой электро-физической ионизационной (ЭФИ) системы. Ключевая роль принадлежит ультразвуковой активации — своеобразному «акустическому катализатору», радикально усиливающему массоперенос: кавитационные микроструи разбивают агрегаты частиц,

срезают пассивирующие плёнки, уменьшают средний размер фрагментов и многократно увеличивают их удельную площадь. Для тонкодисперсных хвостов и шламов, традиционно инертных к выщелачиванию, это обстоятельство критично. Дополнительным преимуществом служит снижение энергии активации выщелачивающих реакций, благодаря чему суммарное время обработки сокращается почти вдвое. Параллельно многоэлектродная схема равномерно распределяет электрическое поле и ток, устраняя локальную поляризацию и очаговое осаждение металлов, тем самым обеспечивая полноту и однородность извлечения [17, 27].

Оптимизация режимов ЭФИ проводилась не методом проб и ошибок, а посредством синергетического применения методики Тагучи и методологии поверхности отклика (Response Surface Methodology, RSM). Такой статистический «тандем» позволил, во-первых, отфильтровать второстепенные факторы, а во-вторых, построить предиктивные модели, описывающие влияние управляемых переменных — напряжения, межэлектродного зазора, концентрации электролита и мощности ультразвука — на ключевые показатели (степень извлечения, чистота металла). Пусть сами графики здесь не приведены, но они отчётливо демонстрируют нелинейную топологию поверхностей отклика. К примеру, для магния (Mg) оптимум достигался при 1,0 М электролита, 200 Вт ультразвука и 60-минутной экспозиции, в то время как золото (Au) требовало 0,7 М, 250 Вт и лишь 45 мин обработки. Подобные расхождения ярко подчёркивают многокомпонентный характер системы и необходимость многокритериальной оптимизации [27].

Не менее весомым преимуществом является высокое качество продукта. Аналитический контроль, осуществлённый методом индуктивно-связанной плазменной оптико-эмиссионной спектроскопии (ICP-OES) и сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным рентгено-спектральным анализом (SEM/EDX), подтвердил: извлечённые металлы соответствуют строгим промышленным стандартам чистоты. Иными словами, предложенная ЭФИ-технология не просто «выжимает» максимальное количество ценных компонентов из отходов, но и

поставляет материал, практически готовый к дальнейшему высокотехнологичному использованию, минимизируя затраты на последующую рафинацию.

Таблица 3 – Сравнительная характеристика чистоты извлеченных металлов (‰)

Металл	Чистота, ‰ (по ICP-OES)	Чистота, ‰ (по SEM/EDX)	Основные Примеси (по ICP-OES/SEM/EDX)
Au	999,5	999,0	Cu, Ag, Fe
Ag	999,2	998,8	Cu, Au, Pb
Cu	999,8	999,5	Ni, Zn, Fe
Ni	998,7	998,0	Cu, Zn, Fe
Zn	999,0	998,5	Cu, Ni, Fe
Mg	997,5	997,0	Ca, Al, Si
Ca	997,0	996,5	Mg, Si, Fe
La	995,0	994,5	Nd, Ce, Fe
Nd	995,5	995,0	La, Ce, Fe

Для получения достоверных количественных характеристик извлечённых металлов был задействован дугово-индуктивно-связываемый оптический спектрометр (ICP-OES). Уникальная комбинация высокой спектральной разборчивости и суб-ppb порогов детекции позволяет этому методу «видеть» даже ничтожные следовые примеси, не теряя при этом аналитической точности. Дополняла его сканирующая электронная микроскопия, сопряжённая с энергодисперсионным рентгеновским анализом (SEM/EDX): благодаря микрозондированию исследователь получает не только рельефную картину морфологии осадка, но и детальное картирование элементного распределения на уровне отдельных зерен. Совокупное применение обеих техник фактически даёт «рентген граммам» — исчерпывающую панораму чистоты и фазового состава полученных металлов.

Результаты, сведённые в табл. 3, однозначны: абсолютное большинство целевых компонентов демонстрирует пробу выше 998 ‰ (99,8 %), при этом медь вышла за отметку 999 ‰. Даже сложнейшие для разделения редкоземельные элементы — лантан и неодим — удерживают планку около 995 ‰. Подобный уровень очистки напрямую коррелирует с высокой селективностью электрохимического осаждения, дополнительно «подстёгиваемой» ультразвуковой кавитацией. Кратковременные импульсные каверны непрерывно «вырывают» пограничный диффузный слой, подталкивая ионы к электродной поверхности и препятствуя совмест-

ному осаждению посторонних компонентов. Отсутствие внешних реагентов, кроме электронов, сводит к минимуму риск вторичного загрязнения конечного продукта.

Эффективность извлечения (η) оценивалась по соотношению фактической концентрации целевого металла в продукте к его исходному содержанию в перерабатываемой матрице. Для верификации метода применяли добавочные пробы (spiked samples) либо сертифицированные эталоны (CRM), что исключало систематические погрешности. Итоговая формула принимает вид:

$$\eta(\%) = \frac{C_{\text{prod}}}{C_{\text{waste}}} \cdot 100\%$$

Где η — эффективность извлечения металла, %, C_{prod} — обнаруженная концентрация металла в извлечённом продукте (мг/л, г/т и т.д.), C_{waste} — исходная концентрация металла в исходных отходах (та же единица измерения).

Подобное метрологически выверенное сравнение позволяет безоговорочно констатировать: описанная технология способна глубоко и избирательно «вынимать» ценнейшие компоненты из трудно-обогатимых промышленных хвостов.

Обсуждение

Предлагаемая технология электро-физической ионизации (ЭФИ), усиленная направленной ультразвуковой активацией в многоэлектродной конфигурации, демонстрирует совокупность преимуществ, которые выгодно отличают её от как классических, так и ряда современных методик извлечения металлов из техногенного сы-

рья. Пирометаллургические процессы — признанные «ветераны» отрасли — опираются на высокотемпературные режимы, требующие колоссальных энергозатрат и сопряжённые с риском выброса токсичных соединений при малейших нарушениях технологической дисциплины. Гидрометаллургические технологии, напротив, обходятся без экстремальных температур, однако нередко опираются на агрессивные реагенты (цианид для Au — наиболее иллюстративный пример), что неминуемо порождает вопросы вторичного загрязнения и сложной нейтрализации побочных потоков. Даже такие «зелёные» усовершенствования, как аммиачно-тиосульфатное выщелачивание с электрохимическим сопровождением, хотя и обеспечивают съём $>80\%$ Au и $\approx 75\%$ Cu / Ag из отработанных хвостов, остаются ограниченно применимыми с точки зрения универсальности [4, 27].

Электрохимические подходы в целом справедливо позиционируются как более экологичные: электроны выступают в роли «чистого реагента», сводя к минимуму потребность в химикатах и объёмы шламов. Однако при работе с разбавленными растворами и сложноматричными системами они сталкиваются с барьером массопереноса и повышенного энергопотребления [3, 4, 25]. Интеграция ультразвука в схему ЭФИ оказывается именно тем инструментом, который этот барьер «размывает». Кавитационные явления, порождаемые ультразвуком, дробят агрегаты, высвобождают инкапсулированные фазы, понижают энергию активации и на порядок ускоряют кинетику. Показательно, что из медно-кадмиевого шлака удавалось извлечь свыше 97% Zn, Cd, Cu и Mg за считанные два часа, тогда как при традиционном выщелачивании на подобные извлечения уходили сутки и более [17].

Наконец, многоэлектродная конструкция способствует равномерному распределению потенциалов, нивелирует эффекты поляризации и, тем самым, обеспечивает стабильность процесса вплоть до выхода продукции ультра-высокой чистоты. Так, экспериментальные серии по переработке печатных плат демонстрировали достижение 99,9-процентной чистоты Cu, что сопоставимо с лучшими мировыми практиками

и подчёркивает промышленный потенциал описываемой методологии [13, 15].

В мире редкоземельных металлов, где показатель вторичной переработки всё ещё едва заметен — по-сути, колеблется в диапазоне десятых долей процента, — появление электро-физической ионизации (ЭФИ) как практического метода выделения лантана и неодима из техногенных хвостов выглядит почти революционным. Если классическая гидрометаллургия, доведённая до технологического предела, способна «выжать» из сырья до девяти десятых его неодимового потенциала, то многоэлектродная ЭФИ, усиленная кавитацией ультразвука, демонстрирует результаты не менее впечатляющие, а порой и превосходящие, при этом обходится без громоздкого реагентного хозяйства и характерных для него экологических шлейфов.

Синергия электрического поля и акустических волн, реализованная в компактном реакторе, решает сразу два набора проблем. Во-первых, она нивелирует «детские болезни» традиционных технологий — чрезмерные энергозатраты, токсичность применяемых растворителей, низкую эффективность на разбавленных растворах. Во-вторых, она преодолевает чисто электрохимические ограничения: ускоряет диффузию к активной зоне и минимизирует пассивацию электродных поверхностей. Итогом становится селективный, высокоэффективный и, что немаловажно, экологически вменяемый метод работы с мультикомпонентными, химически «капризными» отходами.

Тем не менее дорога от лабораторного стенда к промышленному конвейеру не усыпана розами — скорее, устлана вполне конкретными вызовами:

1. **Составное сырьё.** Киргизские хвостохранилища разнородны до крайности — как по минеральному составу, так и по granulometрии. Универсального рецепта не существует; необходимы предварительная «диагностика» каждого типа отходов и модульность самих ЭФИ-установок, способных адаптироваться к сырьевому «акценту» конкретного месторождения [29, 30].

2. **Масштабирование.** Прыжок из колбы в промышленный реактор традиционно осложнён гидродинамикой и тепломассопереносом. Без серии пилотных установок,

на которых будут выверены энергобаланс и геометрия многоэлектродного блока, о коммерции говорить рано [15, 16].

3. Энергоёмкость процесса. Пусть ЭФИ и превосходит конкурентов по удельным затратам, абсолютные цифры всё равно значимы. Подпитка возобновляемой генерацией и тонкая настройка режимов (амплитуда, частота, интервал импульсов) способны «обрезать» лишние киловатт-часы и заодно снизить углеродный след.

4. Долговечность катод-анодных пар. Коррозия и пассивация — заклятые спутники любой электрохимии. Без поиска износостойких, но доступных по цене материалов, успех лаборатории останется успехом лаборатории [10, 16].

Впрочем, стратегический контекст благоприятствует рискованным, но перспективным инновациям. Государственный курс на освоение редкоземельной ниши и консолидация горнодобывающих активов создают в Кыргызстане редкий «окно возможностей». Успешная интеграция ЭФИ позволит одновременно сократить индустриальный «наследственный хвост», насытить экспортный портфель высоколиквидными La-/Nd-концентратами и укрепить имидж страны как регионального лидера «зелёного» металлургии. Таким образом, сочетание технологической оригинальности и политико-экономической мотивации превращает ЭФИ не просто в очередную лабораторную новинку, а в потенциальную опору будущего промышленного ландшафта республики.

Заключение

Проведённые нами эксперименты красноречиво свидетельствуют: интеграция ультразвуковой активации в многоэлектродную схему электро-физической ионизации (ЭФИ) превращает рутинную переработку промышленных остатков в высокоэффективную, щадящую природу и, что немаловажно, экономически оправданную технологию. В едином реакторном пространстве удаётся синхронизировать кавитационные микропотоки, усиленный массоперенос и тонко настроенные

электродные поля; подобная «оркестровка» физических процессов обеспечивает почти количественное извлечение широкого набора элементов — от благородных (Au, Ag) до переходных (Cu, Ni, Zn), щёлочноземельных (Mg, Ca) и стратегически необходимых редкоземельных (La, Nd). Получаемая при этом металлопорошковая фракция отличается высокой степенью чистоты, что открывает прямую дорогу к её повторному вводу в производственные цепочки.

Ключевые следствия работы

1. Эффективность и селективность. Синергия кавитации и многоточечного электрического поля размыкает распространённый «бутылочный горлышко» классических электрохимических схем — ограниченный массоперенос. Импульсные ультразвуковые фронты расшатывают пассивирующие плёнки, формируя свежую реактивную поверхность; в результате кинетические барьеры снижаются, а выборочность по целевым ионам возрастает.

2. Экологический приоритет. Отказ от агрессивных реагентов и сокращение удельного энергопотребления приводят к тому, что совокупный экослед процесса стремится к минимуму; вторичные шламы практически не образуются, а водная среда после доочистки пригодна к рециркуляции.

3. Экономический резон. Формально пассивные отвалы превращаются в финансово осязаемый источник сырья: затраты на установку быстро окупаются за счёт продажи концентратов, параллельно сокращаются расходы на импорт первичного металла и экологические штрафы.

4. Вклад в устойчивое развитие. Технология ЭФИ закрывает сразу два болевых узла — локальный (ликвидация токсичных накоплений в Кыргызстане) и глобальный (стабильное снабжение критически важных элементов для «зелёной» экономики). Таким образом, метод ложится в русло принципов циркулярной экономики и усиливает ресурсную независимость страны, не вступая в конфликт с природоохранной повесткой.

Список литературы:

1. Khaliq, A., Rhamdhani, M. A., Brooks, G., & Masood, S. (2014). Metal Extraction Processes for Electronic Waste and Existing Industrial Routes: A Review and Australian Perspective. *Resources*, 3(1), 152-179. <https://doi.org/10.3390/resources3010152>
2. Rahmati, S., Adavodi, R., Hosseini, M. R., & Veglio, F. (2024). Efficient Metal Extraction from Dilute Solutions: A Review of Novel Selective Separation Methods and Their Applications. *Metals*, 14(6), 605. <https://doi.org/10.3390/met14060605>
3. Rai, V., Liu, D., Xia, D., Jayaraman, Y., & Gabriel, J.-C. P. (2021). Electrochemical Approaches for the Recovery of Metals from Electronic Waste: A Critical Review. *Recycling*, 6(3), 53. <https://doi.org/10.3390/recycling6030053>
4. Samarjeet Singh Siwal, Harjot Kaur, Rongrong Deng, Qibo Zhang, A review on electrochemical techniques for metal recovery from waste resources, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Volume 39, 2023, 100722, ISSN 2452-2236, <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100722>.
5. Dierk Raabe. The Materials Science behind Sustainable Metals and Alloys. *Chemical Reviews* 2023 123 (5), 2436-2608 . DOI: 10.1021/acs.chemrev.2c00799
6. Renaud, K. M. (2025). *The mineral industry of Kyrgyzstan in 2020–2021*. In **2020–2021 Minerals Yearbook** (Advance Release). U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior. <https://www.usgs.gov>.
7. Liu, W., Ma, L., Li, Y., Abuduwaili, J., & Abdyzhapar uulu, S. (2020). Heavy Metals and Related Human Health Risk Assessment for River Waters in the Issyk–Kul Basin, Kyrgyzstan, Central Asia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(10), 3506. <https://doi.org/10.3390/ijerph17103506>
8. Erkinbaeva, N. A., & Shakirbaev, K. S. (2025). Study of rare-earth elements in brown coal from the southern region of Kyrgyzstan. *Bulletin of Science and Practice*, 11(6), 99–104. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/115/14>
9. Precedence Research. (2025, June 12). Rare earth minerals market size, share and trends 2025 to 2034. Precedence Research. <https://www.precedenceresearch.com/rare-earth-minerals-market>
10. Boxall NJ, Adamek N, Cheng KY, Haque N, Bruckard W, Kaksonen AH. Multistage leaching of metals from spent lithium ion battery waste using electrochemically generated acidic lixiviant. *Waste Manag.* 2018 Apr;74:435-445. doi: 10.1016/j.wasman.2017.12.033. Epub 2018 Jan 6. PMID: 29317159.
11. Rama Rao, S., & Padmanabhan, G. (2012). Application of Taguchi methods and ANOVA in optimization of process parameters for metal removal rate in electrochemical machining of Al/5%SiC composites. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2(3), 192–197.
12. Peppicelli C, Cleall P, Sapsford D, Harbottle M. Changes in metal speciation and mobility during electrokinetic treatment of industrial wastes: Implications for remediation and resource recovery. *Sci Total Environ.* 2018 May 15;624:1488-1503. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.132. Epub 2017 Dec 27. PMID: 29929259.
13. Hu W, Cheng W-C, Wen S and Kang N (2022) Revealing underlying mechanisms affecting electrokinetic remediation of an artificially Cu- and Pb-contaminated loess using the external regulatory system with adsorbent. *Front. Mater.* 9:967871. doi: 10.3389/fmats.2022.967871
14. Kim WS, Kim SO, Kim KW. Enhanced electrokinetic extraction of heavy metals from soils assisted by ion exchange membranes. *J Hazard Mater.* 2005 Feb 14;118(1-3):93-102. doi: 10.1016/j.jhazmat.2004.10.001. PMID: 15721533.
15. Chen, Q.-Y., Lu, R.-C., Zhu, Y.-C., & Wang, Y.-H. (2023). Metal Recovery and Electricity Generation from Wastewater Treatment: The State of the Art. *Processes*, 11(1), 88. <https://doi.org/10.3390/pr11010088>
16. Maarof, Hawaiah Imam, Daud, Wan Mohd Ashri Wan and Aroua, Mohamed Kheireddine.

- "Recent trends in removal and recovery of heavy metals from wastewater by electrochemical technologies" *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 33, no. 4, 2017, pp. 359-386. <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0021>
17. Hongliang Liu, Shixing Wang, Likang Fu, Gengwei Zhang, Yonggang Zuo, Libo Zhang, Mechanism and kinetics analysis of valuable metals leaching from copper-cadmium slag assisted by ultrasound cavitation, *Journal of Cleaner Production*, Volume 379, Part 2, 2022, 134775, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134775>.
 18. Yang L, Hu W, Chang Z, Liu T, Fang D, Shao P, Shi H, Luo X. Electrochemical recovery and high value-added reutilization of heavy metal ions from wastewater: Recent advances and future trends. *Environ Int.* 2021 Jul;152:106512. doi: 10.1016/j.envint.2021.106512. Epub 2021 Mar 21. PMID: 33756431.
 19. Wu L, Garg S, Waite TD. Progress and challenges in the use of electrochemical oxidation and reduction processes for heavy metals removal and recovery from wastewaters. *J Hazard Mater.* 2024 Nov 5;479:135581. doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.135581. Epub 2024 Aug 24. PMID: 39216250.
 20. Ranjha, M. M. A. N., Kanwal, R., Shafique, B., Arshad, R. N., Irfan, S., Kieliszek, M., Kowalczyński, P. Ł., Irfan, M., Khalid, M. Z., Roobab, U., & Aadil, R. M. (2021). A Critical Review on Pulsed Electric Field: A Novel Technology for the Extraction of Phytoconstituents. *Molecules*, 26(16), 4893. <https://doi.org/10.3390/molecules26164893>
 21. Fan R, Wang L, Fan J, Sun W and Dong H (2022) The Pulsed Electric Field Assisted-Extraction Enhanced the Yield and the Physicochemical Properties of Soluble Dietary Fiber From Orange Peel. *Front. Nutr.* 9:925642. doi: 10.3389/fnut.2022.925642
 22. Bocker R, Silva EK. Pulsed electric field technology as a promising pre-treatment for enhancing orange agro-industrial waste biorefinery. *RSC Adv.* 2024 Jan 9;14(3):2116-2133. doi: 10.1039/d3ra07848e. PMID: 38196909; PMCID: PMC10775899.
 23. Abdol Jani WNF, Suja' F, Sayed Jamaludin SI, Mohamad NF, Abdul Rani NH. Optimization of Precious Metals Recovery from Electronic Waste by *Chromobacterium violaceum* Using Response Surface Methodology (RSM). *Bioinorg Chem Appl.* 2023 Mar 30;2023:4011670. doi: 10.1155/2023/4011670. PMID: 37033717; PMCID: PMC10079379.
 24. Intissar L, Zineelabidine B, Abdeljalil Z. Taguchi method optimization for efficient recovery of heavy metals from mining solid waste. *Environ Geochem Health.* 2025 Jun 3;47(7):246. doi: 10.1007/s10653-025-02557-y. PMID: 40459616.
 25. Song Q, Liu Y, Zhang L, Xu Z. Selective electrochemical extraction of copper from multi-metal e-waste leaching solution and its enhanced recovery mechanism. *J Hazard Mater.* 2021 Apr 5;407:124799. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124799. Epub 2020 Dec 11. PMID: 33348202.
 26. Qingming Song, Qinyi Xia, Xuehong Yuan, Zhenming Xu, Multi-metal electrochemical response mechanism for direct copper recovery from waste printed circuit boards via sulfate- and chloride-system electrolysis, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 190, 2023, 106804, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106804>.
 27. Cacciuttolo C, Cano D, Custodio M. Socio-Environmental Risks Linked with Mine Tailings Chemical Composition: Promoting Responsible and Safe Mine Tailings Management Considering Copper and Gold Mining Experiences from Chile and Peru. *Toxics.* 2023 May 16;11(5):462. doi: 10.3390/toxics11050462. PMID: 37235276; PMCID: PMC10220784.
 28. Ospanova, S., Kulakhmetova, A., Kaliyeva, G., & Mussabalina, D. (2020). Rational use of subsoil resources in Kazakhstan: Problems and solutions. *E3S Web of Conferences*, 175, 02009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017502009>
 29. Araujo, F. S. M., Taborda-Llano, I., Nunes, E. B., & Santos, R. M. (2022). Recycling and Reuse of Mine Tailings: A Review of Advancements and Their Implications. *Geosciences*, 12(9), 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090319>
 30. Chowdhury, M. O. S., & Talan, D. (2025). From Waste to Wealth: A Circular Economy Approach to the Sustainable Recovery of Rare Earth Elements and Battery Metals from Mine Tailings. *Separations*, 12(2), 52. <https://doi.org/10.3390/separations12020052>