

Технологическая возможность и экономическая целесообразность извлечения редких и редкоземельных металлов из попутных и шахтных вод

Т. В. Ермошина

Санкт-Петербургский горный
университет императрицы
Екатерины II

tatyanaa135@mail.ru

К. А. Чернецова

Санкт-Петербургский горный
университет императрицы
Екатерины II

xen.chernetsova3110@yandex.ru

Н. С. Мартынов

Санкт-Петербургский горный
университет императрицы
Екатерины II

martynoffn@mail.ru

В. И. Козлова

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

tu1en41k@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена комплексному анализу технологий извлечения редких и редкоземельных металлов (РЗМ) из промышленных вод, образующихся при разработке месторождений полезных ископаемых, и потенциальных экономических выгод от реализации таких добычных проектов. Раскрываются существующие способы извлечения, отмечаются сложности в оценке запасов попутных вод нефтегазовых месторождений, а также шахтных и карьерных вод на горнодобывающих предприятиях, служащих источниками редких металлов и РЗМ. Приводится оценка различными авторами капитальных и эксплуатационных затрат по извлечению полезных компонентов из гидроминерального сырья, потенциальных объёмов и экономической эффективности их добычи. В заключительной части работы технологии искусственного интеллекта рассматриваются как способ решения выявленных технологических проблем и повышения экономических выгод от добычи редких и редкоземельных металлов из нетрадиционного сырья.

Ключевые слова: редкоземельные металлы; редкие металлы; редкоземельные элементы; гидроминеральное сырьё; гидрометаллургия; мембранные технологии; дренажные воды; попутные воды; добыча полезных ископаемых; государственно-частное партнерство; оценка запасов; экономическая эффективность; нефтегазовые месторождения; искусственный интеллект

I. ВВЕДЕНИЕ

Сегодня редкие и редкоземельные металлы лежат в основе практически всех технологий, которые формируют современный мир: без неодима, самария, скандия и других представителей этой группы металлов невозможно представить себе микроэлектронику, авиа- и приборостроение, оборонную промышленность, возобновляемую энергетику, производство магнитов и катализаторов. В связи с ключевой ролью РЗМ в стратегическом развитии, их ограниченным количеством и постоянно растущим мировым спросом (ожидается, что к 2029 году он достигнет практически 11 млрд долларов США [15]) особенно важно обеспечивать необходимый уровень добычи. Редкие металлы так же

играют важную роль в целом ряде областей промышленности. Так, литий является основой для литий-ионных аккумуляторов, необходимых в производстве электромобилей и портативной электроники, рубидий и цезий так же могут применяться в электронике, химической, атомной (рубидий) и ядерной (цезий) промышленности, в медицине. Именно поэтому целесообразно рассматривать не только традиционные источники редких металлов и РЗМ, но и вторичные способы их добычи, например, добычу из красного шлама и зольных отходов, извлечение редких и редкоземельных металлов из подземных вод, карьерных и шахтных водоотливов, попутных вод нефтегазовых месторождений, которые часто содержат высокие концентрации рассматриваемых элементов [8, 10, 11]. Согласно исследованию [5], в Европейском союзе за счёт переработки вторичных ресурсов достигается 4% извлечения тяжёлых и 3% извлечения лёгких РЗЭ.

В рамках исследования вопросов извлечения редких и редкоземельных металлов из попутных и шахтных вод актуальной становится задача рассмотрения его технологических аспектов и потенциальных экономических выгод компаний, а также поиска путей решения возможных проблем, связанных с ними.

II. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Извлечение РЗМ из водных растворов характеризуется сложностью, нестабильным составом, зависимостью от сезонных, геологических и других факторов. В гидрометаллургии обычно выделяются следующие методы разделения химических элементов в растворе: адсорбция, осаждение, ионный обмен, электрокоагуляция, флотация и экстракция растворителем. Последний способ является наиболее распространённым методом разделения и извлечения РЗЭ. Гидрометаллургическое извлечение имеет свои преимущества, например, высокая степень извлечения РЗЭ и возможность добычи металлов даже из низкосортных ресурсов. При этом оптимизация условий выщелачивания – таких как кислотность среды рН,

соотношение твёрдой и жидкой частей раствора (пульповое соотношение), скорость перемешивания и температура – непостоянна и меняется от случая к случаю [7].

Ключевым ограничением гидрометаллургических методов является низкая селективность при разделении соседних редкоземельных элементов, т.к. химические свойства РЗЭ и их факторы разделения незначительно отличаются друг от друга. В результате для достижения высокой чистоты требуются многоступенчатые процессы экстракции и промывки, что приводит к образованию больших объёмов кислых вод и органических растворителей, которые, в свою очередь, влекут за собой высокий расход дорогостоящих реагентов и негативно влияют на экологию [18].

Кислые шахтные воды, образующиеся в процессе горных работ, считаются опасными для окружающей среды из-за низкого pH и высокого содержания растворенных металлов, и их состав значительно различается в разных регионах мира и определяется геологическими условиями, способом добычи, минералогией руд и экологическими факторами. Часто редкие и редкоземельные металлы в этих водах содержатся в количествах, приемлемых для добычи, поэтому извлечение РЗЭ из кислых шахтных вод не только обеспечивает увеличение количества ценных ресурсов, но и способствует очистке загрязнённых вод за счет удаления из них опасных компонентов, что делает эту технологию приемлемой для реализации программ устойчивого развития и ресурсопользования. Главный минус такого источника РЗМ – присутствие ионов других металлов в водах и низкая селективность металлов при извлечении, что влечёт за собой большую энергоёмкость и стоимость технологии [9].

С развитием науки распространение получают новые методы: мембранные способы и биосорбция. В реальном производстве для определения концентрации и содержания компонентов часто используют изменение цвета экстрагированного раствора – так называемые методы мягкого измерения. Метод биосорбции основан на использовании биологических организмов, чаще всего бактерий, который способны связываться с катионами редкоземельных металлов и извлекать их [5].

Мембранные методы разделения привлекают всё большее внимание как более экологичные и эффективные альтернативы для разделения РЗЭ. По сравнению с традиционными методами они обеспечивают более высокую селективность, хорошую управляемость, меньшее потребление химических реагентов, минимальное образование отходов, благодаря чему снижается воздействие на окружающую среду и достигаются более высокие показатели выхода и чистоты продуктов. В этом методе выделяются жидкие мембраны (в том числе объёмные, эмульсионные и поддерживаемые жидкие мембраны) и нежидкие мембраны. Благодаря стабильности, селективности и возможности длительной эксплуатации нежидкие мембраны рассматриваются как перспективная платформа для извлечения РЗЭ из сложных многокомпонентных сред, в том числе из шахтных вод [18].

Основные методы извлечения редких металлов из попутных вод месторождений нефти и газа во многом

схожи с рассмотренными ранее технологиями. Так, Д. А. Савиновский и М. А. Касперович выделяют следующие основные способы такого извлечения: метод сорбционного извлечения, экстракционный метод, мембранный метод и галлургический метод с многостадийным выпариванием.

Первый метод выделяется как наилучшим образом подходящий для российских условий, например, месторождений Восточной Сибири, разрабатываемых ПАО «Сургутнефтегаз». Впрочем, даже он, по мнению экспертов, требует качественных изменений под специфику конкретных рассолов. Второй метод имеет достаточно сложную технологию и может сопровождаться трудностями в извлечении конечного продукта из рассолов с низкой концентрацией. Третий метод авторы характеризуют как невыгодный с экономической точки зрения по причине дорогостоящих селективных мембран, но применяемый в лабораторных исследованиях. Четвёртый – получил широкое распространение в природных бассейнах США, Чили, Австралии и Боливии, но его классический вариант может иметь трудности при переработке вод российских нефтегазовых месторождений, обусловленные необходимостью их предварительной очистки от ионов магния и щелочноземельных металлов – элементов, усложняющих извлечение редких металлов [4].

В целом среди технологических проблем извлечения редких металлов из промышленных вод можно выделить: сложность оценки реальных концентраций вод и их изменчивость (в т.ч. разубоживание при эксплуатации месторождений с ППД), зависимость объёмов попутных вод от стадии разработки месторождения, необходимость адаптации зарубежных и отечественных технологий извлечения к условиям российских месторождений. Эти причины порождают необходимость регулярного мониторинга концентраций и объёмов подземных вод, рассмотрения различных способов и сценариев добычи. Затраты на проведение столь обширного анализа – один из факторов экономической эффективности извлечения и потому требуют оптимизации.

Доказательством экономической целесообразности извлечения редких и редкоземельных металлов из нетрадиционных (гидроминеральных) источников может служить наличие ряда проектов, причем как российских, так и зарубежных недропользователей.

В качестве зарубежного опыта можно привести проект агентства «E3 Metals Corp» для формации Ледюк в Альберте, Канада. В своей статье Р. Санчес-Росарио и З. Л. Гильденбранд говорят о возможности извлечения более 90% лития из нефтепромысловых рассолов при концентрации лития на уровне 74,6 мг/л в виде его гидроксида с годовой производительностью 20 тыс. тонн. Извлечение предполагается проводить в 3 этапа: первый из которых – перекачка обогащённых литием вод на поверхность; второй – получение высококачественного литиевого концентрата путём проведения ионного обмена; третий – производство конечного продукта (гидроксид или карбонат) путём очистки, электролиза и кристаллизации. При этом компания заявляет капитальные затраты (CAPEX) на уровне 602 000 млн. долларов США, а эксплуатационные (OPEX) – на уровне 73 200 млн. долларов США.

Партнёрство агентства с GreenCentre Canada и Национальным исследовательским советом Канады, рядом коммерческих предприятий, а также участие в Программе содействия промышленным исследованиям NRC свидетельствует о поддержке проекта и дальнейших планах его масштабирования [19].

Исследование сотрудников института водных исследований Западной Вирджинии (США) описывает технологию извлечения РЗЭ из кислых шахтных вод, разработанную компанией L3Eng совместно с Политехническим университетом Западной Вирджинии. Процесс включает двухстадийное осаждение на месте образования вод с получением концентрата (содержание РЗЭ 1–5 %), последующее выщелачивание соляной кислотой и разделение химическими реагентами. Себестоимость извлечения составляет 60,76 \$/кг РЗЭ, что почти вдвое выше традиционных источников, однако концентрат богат ценными тяжёлыми и магнитными элементами (Y, Nd, Pr, Tb). Более 50 % операционных затрат приходится на химические реагенты. Анализ чувствительности показал, что рентабельность определяется капитальными затратами и ценами на сырьё; в качестве путей оптимизации предлагается использование ионных жидкостей или вторичное применение хлоридов. Монте-Карло моделирование даёт диапазон внутренней нормы доходности IRR 18–35 %, но авторы отмечают высокий уровень риска и необходимость государственно-частного партнёрства [15].

Примером российского опыта извлечения служит пилотный проект, направленный на добычу соединений лития из попутных вод Ковыктинского месторождения, разработку которого осуществляет ПАО «Газпром», описанный в работе Г. Ю. Боярко, В. Ю. Хатькова и Е. В. Ткачевой. Авторы, характеризуя пластовые воды месторождения как высокоминерализованные (концентрация лития на уровне 380 мг/л), говорят о перспективах производства карбоната лития в объёме 7,05 т в год для одной добычной скважины [1].

CAPEX при этом приняты на уровне 1,8 млрд рублей и состоят из затрат на геологоразведочные работы, необходимое для извлечения оборудование и его установку, требуемые инфраструктурные объекты и прочих затрат. OPEX приводятся в размере 238 млн рублей ежегодно. В основе технологии при этом лежит адсорбционный метод (улавливание ионов лития сорбентами на основе марганца или алюминия). С учётом цен на литий, действующих в настоящее время, по оценкам экспертов, проект способен обеспечить внутреннюю норму доходности (IRR) 15,7% при запуске в 2025 году. В качестве перспектив развития проекта, в том числе кратного увеличения потенциальных объёмов добычи и увеличения длительности проекта, может рассматриваться строительство дополнительных скважин.

В соответствии с данными на конец 2025 года, проект был на завершающей стадии научно-исследовательских работ (НИР). Научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки (НИОКР) проводятся ПАО «Газпром» вместе с ООО «Иркутская нефтяная компания». А. Ю. Цивадзе, А. А. Бездомников и Г. В. Костикова уже сейчас характеризуют проект как весьма перспективный и пригодный для реализации, а министр природных ресурсов и экологии России

Александр Александрович Козлов сообщил о планах «Газпрома» начать добычу лития из гидроминерального сырья к 2029 году [2, 17].

Анализ рентабельности извлечения редких металлов на примере извлечения лития из вод Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения проводят в своей работе А. А. Бандалегова, А. Ю. Гаврилов, Е. В. Галин. Авторы приходят к выводу о минимальной концентрации лития 200 мг/л при ежегодном объёме попутных вод 1,5 млн м³ как о граничном условии рентабельности извлечения сорбционным методом с использованием сорбента ДГАЛ-С1. Этот вывод подтверждается положительным чистым дисконтированным доходом (NPV) при указанных и более высоких концентрациях и сроке реализации проекта 10 лет [2]. Точных значений NPV авторы не приводят.

В России также выявлены значительные концентрации РЗЭ в шахтных водах. Учёные Института горного дела УрО РАН (Екатеринбург) Л. С. Рыбникова и П. А. Рыбников на примере затопленного Левихинского рудника рассчитали коэффициенты концентрации РЗЭ относительно промышленного содержания. По их оценке, суммарная извлекаемая ценность цветных и редкоземельных металлов из вод этого рудника превышает 4 млн \$ США в год [3].

Таким образом, анализ некоторых существующих проектов по разработке и запуску производства лития из попутных вод нефтегазовых месторождений, а также извлечению редкоземельных металлов из кислых шахтных вод и растворов как в России, так и за рубежом свидетельствует о перспективности рассматриваемого направления с экономической точки зрения и его осуществимости с технологической точки зрения (в т. ч. сорбционным и ионообменным способами для лития экстракционными, мембранными способами для редкоземельных металлов).

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время активно развиваются подходы к извлечению РЗЭ с применением искусственного интеллекта. Модели машинного обучения позволяют прогнозировать эффективность выщелачивания и оптимизировать его параметры за счёт статистического анализа больших массивов данных. Разрабатываются интеллектуальные системы очистки шахтных вод, объединяющие датчики интернета вещей, собирающие информацию о pH, электропроводности, концентрации металлов и передающие их в облачные платформы для мониторинга в реальном времени и адаптивного управления. Это способствует раннему обнаружению неисправностей и созданию автономной инфраструктуры извлечения РЗЭ. В области биосорбции применение машинного обучения совместно с модифицированными микроорганизмами и цифровыми двойниками позволяет сократить отходы и энергопотребление. Для мембранных методов, характеризующихся многопараметрической зависимостью (состав мембраны, pH, температура, гидродинамика), ИИ и машинное обучение обеспечивают обработку многомерных данных, выявление скрытых закономерностей и управление процессом в реальном времени, снижая временные и ресурсные затраты по сравнению с эмпирическими подходами [13, 18].

При извлечении редких металлов из попутных вод нефтегазовых месторождений технологии ИИ могут применяться для целей создания прогнозных моделей, направленных на выявление реальных концентраций металлов в определённых пластах; автоматизированного контроля состава попутных вод в режиме реального времени; оптимизации технологических процессов извлечения и предварительного моделирования использования разных методов очистки вод и добычи из них редких металлов, формирования прогнозов эффективности применения тех или иных реагентов и катализаторов. Также ИИ будет полезен для контроля качества выпускаемой продукции и безопасности процесса её получения, отслеживания состояния используемого оборудования с помощью специальных датчиков, предотвращения технических сбоев и составления оптимальных графиков техобслуживания [6, 14].

В качестве конкретных технологических решений в данной области можно предложить уже упомянутые системы машинного обучения (пригодные для обработки больших объёмов геологических и технологических данных), цифровые двойники технологических процессов (пригодные для апробации новых технологий в виртуальном пространстве), а также технологии предиктивной аналитики (для получения прогнозов выхода редких металлов и управления производственным процессом) [12, 16, 17].

Среди преимуществ таких методов: возможность снижения затрат на реагенты и энергию в связи с более грамотной организацией процессов извлечения, рост эффективности извлечения редких металлов в связи с более точным его контролем, снижение экологических рисков за счёт регулярного мониторинга и предотвращения аварий, автоматизация сложных процессов анализа данных и обоснования решений. Среди недостатков – необходимость предварительного отбора и анализа массива достоверных данных для обучения ИИ корректной работе; значительные первоначальные инвестиции для внедрения ИИ-систем; необходимость квалифицированных специалистов по применению ИИ в данной области; сложности в адаптации общих решений под конкретные условия месторождений [20]. В конечном итоге, использование ИИ может помочь организовать процесс добычи наиболее оптимальным и безопасным образом с учётом современных технологий извлечения и требований к качеству конечной продукции, что сделает его более экономически выгодным, поможет избежать ошибок, сбоев и неоправданных затрат.

Можно выделить ряд проблем, связанных с внедрением технологий извлечения редкоземельных и редких металлов из попутных шахтных и дренажных вод. Например, достоверность показателей концентрации РМ и РЗМ в дренажных водах подтверждается оценкой запасов по высокой категории (В или А). Такую категорию можно получить только на основе многолетних наблюдений (осуществление мониторинга), а это связано с циклом деятельности горного предприятия или работы скважины и степенью достоверности геолого-разведочных работ (ГРП) по выявлению генезиса промышленных вод. К тому же запуск технологических цепочек по извлечению РМ и РЗМ возможен только при

исследовании комплекса составляющих факторов: наличие электроэнергии, трудовых ресурсов, логистики, экологических рисков и условий для утилизации отходов (так как процесс извлечения и разделения редких металлов является весьма отходоёмким). Экономические риски определяются не только технико-технологическими характеристиками производственных цепочек, но и в огромной степени достоверностью ГРП на изучение перспективных эксплуатационных запасов месторождения. Именно в этой связи необходимо оценивать риски и инвестировать капитал на совершенствование методик ГРП в специфике происхождения исследуемых групп РМ и РЗМ, поскольку шахтные и дренажные воды рассматриваются в особой категории – промышленные воды. Шахтный или карьерный водоотлив, как и собственно скважинная добыча попутных вод имеет ограниченный период «жизни», что связано с циклом разработки основного месторождения, либо с изменением технологии добычи. Недочет этих факторов также влияет на прогнозы использования дренажных вод в качестве сырья для проектирования предприятия по извлечению РМ и РЗМ [9, 10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю., Ткачева Е.В. Сырьевой потенциал лития России// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 12. С. 7-16.
- [2] Бандалетова А.А., Гаврилов А.Ю., Галин Е.В. Извлечение лития из попутных вод на примере Оренбургского НГКМ// ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2021. № 6(1). С. 29-32.
- [3] Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Эколого-экономическая оценка шахтных вод на примере затопленных медноколчеданных рудников Урала // ВХР, 2016. С. 52-65.
- [4] Савиновский Д.А., Касперович М.А. Опробование метода извлечения лития из пластовых вод Восточной Сибири// Бурение & нефть. 2024. № 9. С. 54-57.
- [5] Ahmed Anik M.A., Rahman A., Hoque M.I., Wasi A.T., Shafikul Islam M., Ahsan M.M., Bappy M.M. Biotwinmine: Digital Twin-Based Optimization of Biomining for Sustainable Rare Earth Element Production. Available at SSRN 5258720, 2025. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5258720>
- [6] Asadulagi M.M, Ioskov G.V., Tronina E.V. Synthesis of Lumped and Distributed Controllers for Control System of Hydrodynamic Process, 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019, Vladivostok: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 8933859. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2019.8933859>.
- [7] Ereemeeva A.M., Ilyushin Y.V. Temperature Control During Storage of Raw Materials in the Process of Biodiesel Fuel Production. Inventions, 2025, №10, 7. <https://doi.org/10.3390/inventions10010007>
- [8] Golovina E.I., Chirkina S.A. Optimization of the groundwater extraction taxation system in the Russian Federation. Geology and Mineral Resources of Siberia, 2025, № 46 (64), 185-194. DOI 10.20403/2078-0575-2025-4b-185-194
- [9] Golovina E.I. Strategic issues groundwater extraction management in Russia. Journal of Ecological Engineering, 2017, 18(3), 13-21. <https://doi.org/10.12911/22998993/70202>
- [10] Golovina E.I., Grebneva A. Some Aspects of Groundwater Resources Management in Transboundary Areas. Journal of Ecological Engineering, 2021, №22(4), 106-118. <https://doi.org/10.12911/22998993/134037>
- [11] Golovina E.I., Khloponina V.S. Problems of modern legislation in the sphere of underground waters extraction management. Geology and Mineral Resources of Siberia, 2020, 1, 106-114. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2020-1-106-114>
- [12] Iyushin Y.V., Boronko E.A. Development of a Mathematical Model of the Electromagnetic Field Formation Process Based on System

- Analysis Methods. Mathematics; 2026, №14, 399. <https://doi.org/10.3390/math14030399>
- [13] Ilyushin Y.V., Nosova V.A. Development of Mathematical Model for Forecasting the Production Rate. *International Journal of Engineering*, 2025, №38(8), 1749-1757. <https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.08b.02>
- [14] Kleshnia V.A., Kukharova T., Fedosov I.S., Tsapleva V.V. Modeling of Pressure Control System in Oil Wells Accounting for Reservoir Non-Homogeneity. 2025 VI International Conference on Control in Technical Systems (CTS), 2025, 64-67. <https://doi.org/10.1109/CTS67336.2025.11196275>
- [15] Larochelle T., Noble A., Ziemkiewicz P., Hoffman D., Constant J. A fundamental economic assessment of recovering rare earth elements and critical minerals from acid mine drainage using a network sourcing strategy. *Minerals*. 2021. Vol. 11. № 11. P. 1-18. DOI:10.3390/min11111298
- [16] Marinina O.A., Ilyushin Y.V., Kildiushov E.V. Comprehensive Analysis and Forecasting of Indicators of Sustainable Development of Nuclear Industry Enterprises. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*; 2025, №38(11):2527-3610.5829/ije.2025.38.11b.05
- [17] Marinina O.A., Nechitailo A.R., Stroykov G.A., Tsvetkova A.Y., Reshneva E.A., Turovskaya L.G. Technical and Economic Assessment of Energy Efficiency of Electrification of Hydrocarbon Production Facilities in Underdeveloped Areas. *Sustainability*, 2023, № 15, T 9614. C 9614 - 9629
- [18] Nguyen Q.L., Lai H.N., Nguyen H.T.M., Pham L.L., Herdean A., Poddar N., Kuzhiumparambil U., Nguyen A., Pernice M., Ralph P.J., Phong H.N. Explainable artificial intelligence for predicting rare earth elements leaching from secondary resources. *Journal of Hazardous Materials*. 2025. T. 496. C. 139479. DOI:10.1016/j.jhazmat.2025.139479
- [19] Sanchez-Rosario R., Hildenbrand Z.L., Produced water treatment and valorization: A techno-economical review. *Energies*. 2022. Vol. 15. №. 13. P. 4619.
- [20] Tukeev D.L., Afanaseva O.V., Tulyakov T.F. Realization of Statistical Models Based on Symmetric Unimodal Distributions. *International Journal of Engineering Transactions B Applications*, 2026, №39(6), 407-419. <https://doi.org/10.5829/IJE.2026.39.02B.10>