



Рециклинг нефелинового шлама в эффективные сорбенты для глубокой очистки хромосодержащих сточных вод

А.Г. Бобрик^{1✉}, А.И. Матюшенко²

^{1,2}Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Целью данной работы является оценка потенциала нефелинового шлама, образующегося на Ачинском глиноземном комбинате, в качестве эффективного сорбента для очистки промышленных сточных вод от шестивалентного хрома (Cr(VI)). Проведены лабораторные эксперименты по изучению адсорбционной способности шлама. Определены химический состав и структура образцов методом рентгенофлуоресцентного и рентгенофазового анализа. Микроструктура оценена с помощью сканирующей электронной микроскопии. Рентгенофазовый анализ выявил, что основными компонентами шлама являются карбонат кальция и дикальцийсиликат. Отмечены высокие уровни дисперсности и щелочности материала. Электронная микроскопия показала пористую структуру шлама, обеспечивающую большую доступную поверхность для сорбции. Установлено, что термически обработанный нефелиновый шлам проявляет высокую сорбционную активность по отношению к ионам Cr(VI). Повышение температуры обработки увеличивает удельную поверхность материала и число активных центров, способствуя эффективному захвату и нейтрализации ионов хрома. Изменение pH среды также оказывает положительное влияние на процесс сорбции. Результаты испытаний показали, что использование шлама позволяет снизить концентрацию Cr(VI) до уровней, соответствующих нормативным требованиям по сбросу сточных вод в водные объекты. Использование этого отхода позволит снизить зависимость от импортных реагентов, уменьшить объемы складированных отходов и улучшить экологическую ситуацию в регионе. Пористая структура шлама обеспечивает эффективное взаимодействие с загрязняющими веществами. Таким образом, проведенные исследования подтверждают перспективность использования нефелинового шлама в качестве эффективного и экономически целесообразного сорбента для очистки промышленных сточных вод от шестивалентного хрома.

Ключевые слова: хромосодержащие сточные воды, гальваническое производство, сорбционные материалы, минеральные сорбенты, отходы промышленности

Для цитирования: Бобрик А.Г., Матюшенко А.И. Рециклинг нефелинового шлама в эффективные сорбенты для глубокой очистки хромосодержащих сточных вод // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2025. Т. 15. № 4. С. 655–665. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-4-655-665>. EDN: FALPNZ.

Original article

Recycling of nepheline sludge into effective sorbents for deep purification of chromium-containing wastewater

Anastasia G. Bobrik^{1✉}, Anatoly I. Matyushenko²

^{1,2}Siberian Federal University, School of Engineering and Construction, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The purpose of this work is to evaluate the potential of nepheline sludge formed at the Achinsk Alumina Combine as an effective sorbent for industrial wastewater treatment from hexavalent chromium (Cr(VI)). Laboratory experiments have been conducted to study the adsorption capacity of sludge. The chemical composition and structure of the samples were determined by X-ray fluorescence and X-ray phase analysis. The microstructure is assessed using scanning electron microscopy. X-ray phase analysis revealed that the main components of the sludge are calcium carbonate and dicalcium silicate. High

levels of dispersion and alkalinity of the material are noted. Electron microscopy has shown a porous sludge structure providing a large available surface for sorption. It has been established that heat-treated nepheline sludge exhibits high sorption activity with respect to Cr(VI) ions. Increasing the processing temperature increases the specific surface area of the material and the number of active centers, contributing to the effective capture and neutralization of chromium ions. Changing the pH of the medium also has a positive effect on the sorption process. The test results showed that the use of sludge makes it possible to reduce the concentration of Cr(VI) to levels that meet the regulatory requirements for wastewater discharge into water bodies. The use of this waste will reduce dependence on imported reagents, reduce the volume of stored waste and improve the environmental situation in the region. The porous structure of the sludge ensures effective interaction with pollutants. Thus, the conducted studies confirm the prospects of using nepheline sludge as an effective and economically feasible sorbent for industrial wastewater treatment from hexavalent chromium.

Keywords: chromium-containing wastewater, electroplating production, sorption materials, mineral sorbents, industrial waste

For citation: Bobrik A.G., Matyushenko A.I. Recycling of nepheline sludge into effective sorbents for deep purification of chromium-containing wastewater. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2025;15(4):655-665. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2025-4-655-665>. EDN: FALPNZ.

ВВЕДЕНИЕ

Красноярский край характеризуется богатыми природными ресурсами и высоким уровнем промышленного развития, что обеспечивает региону значительный экономический потенциал.

Вместе с тем интенсивное промышленное производство сопровождается серьезными экологическими проблемами, среди которых одной из наиболее острых является проблема утилизации отходов. Одним из крупнейших источников отходов в регионе выступает Ачинский глиноземный комбинат (АГК), производящий значительную долю твердых отходов Красноярского края.

По данным статистики, этот комбинат генерирует порядка 99 % от общего объема твердых отходов г. Ачинск, основным компонентом которого является нефелиновый шлам – побочный продукт производства глинозема [1]. Традиционный метод утилизации нефелинового шлама, такой как складирование на полигонах, оказывается малоэффективным и не решает проблему в долгосрочной перспективе. Более того, он требует значительных земельных ресурсов и создает риск дальнейшего загрязнения окружающей среды [2, 3].

В связи с этим возрастает актуальность разработки и внедрения инновационных технологий переработки и утилизации нефелинового шлама, позволяющая извлекать ценные компоненты и использовать их в различных отраслях промышленности [4, 5]. Сам по себе нефелиновый шлам обладает значительным содержанием полезных элементов, таких как оксиды кремния, алюминия, железа, натрия и

калия, что делает его сырьем для вторичной переработки. Его используют в производстве строительных материалов, таких как цемент, кирпич, керамическая плитка. Его также используют при создании дорожных покрытий и оснований дорог – добавляют в асфальтобетонные смеси для повышения износостойкости покрытия и т. д. [6]. На сегодняшний день объемы переработки нефелинового шлама остаются недостаточными и составляют лишь около 500 тыс. тонн в год, тогда как общие запасы исчисляются миллионами тонн [1].

Сложившаяся ситуация представляет собой серьезный вызов для региональных властей и промышленных предприятий, требуя разработки комплексных стратегий и внедрения инновационных технологий в области переработки отходов [7]. Эффективная утилизация нефелинового шлама не только позволит снизить негативное воздействие на окружающую среду [8], но и откроет новые перспективы для развития экономики края. Таким образом, решение этой проблемы в Красноярском крае представляет собой сложную задачу, требующую скоординированных усилий со стороны органов власти, промышленных предприятий и научного сообщества. Одним из направлений рационального использования нефелинового шлама является его применение в области водоочистки [9, 10]. Проблема загрязнения водоемов тяжелыми металлами становится особенно острой ввиду расширения масштабов промышленного производства. Так, одной из ключевых проблем остается удаление шестивалентного хрома (Cr(VI)) из промышленных сточных вод [11, 12]. Шестивалентный хром,

используемый в металлургии, химической промышленности и производстве покрытий, способен накапливаться в водной среде и оказывать токсическое воздействие на организм человека и экосистемы в целом [13–15].

Современные подходы к удалению Cr(VI) включают различные физико-химические процессы, однако большинство традиционных методов обладают рядом недостатков: низкой эффективностью удаления загрязняющих веществ, высокими затратами энергии и сложностью эксплуатации оборудования [16, 17]. Это создает предпосылки для разработки новых инновационных решений, позволяющих снизить нагрузку на окружающую среду и обеспечить эффективную очистку промышленных сточных вод. В связи с этим, актуальным направлением является разработка и применение новых сорбционных материалов, обладающих высокой селективностью и эффективностью по отношению к Cr(VI). Нефелиновый шлам представляет собой перспективный сорбент благодаря своему химическому составу и пористой структуре. Основными компонентами нефелинового шлама являются гидросиликаты, алюминаты и карбонаты, способные вступать в реакции ионного обмена и комплексобразования с ионами Cr(VI) [1].

Целью настоящего исследования стало изучение возможности использования природного минерального ресурса, нефелинового шлама, для эффективного удаления шестивалентного хрома из сточных вод гальванической промышленности. Такой подход позволит существенно сократить объем накопленных отходов, повысить эффективность процесса очистки сточных вод и внести вклад в улучшение экологической ситуации региона. Таким образом, разработка инновационного сорбционного материала, полученного из отхода глиноземного комбината, позволяет решить сразу несколько задач. Во-первых, это снижает зависимость от импортных реагентов и способствует развитию региональной экономики. Во-вторых, использование побочных продуктов производства глинозема потенциально снижает стоимость процесса очистки по сравнению с традиционными методами, основанными на применении синтетических сорбентов.

МЕТОДЫ

Для достижения поставленной цели было проведено исследование для оценки потенциала нефелинового шлама, образовавшегося в результате производства глинозема на Ачинском глиноземном комбинате, в качестве эффективного сорбента для очистки промышленных сточных вод от ионов шестивалентного

хрома (Cr(VI)), включающее лабораторные эксперименты по изучению адсорбционных свойств нефелиновых шламов. Анализируя существующие публикации и экспериментальные данные [18–25], можно сделать вывод, что использование природных минеральных соединений в качестве сорбентов имеет значительные преимущества перед традиционными материалами, такими как активированные угли, полимерные смолы и органические наполнители. Преимущества заключаются в доступности сырья, низком уровне энергопотребления и высоких показателях эффективности извлечения загрязнений. В ходе подготовки были отобраны образцы нефелинового шлама. Предварительно образцы проходили подготовку, включающую сушку при комнатной температуре и последующее тонкое измельчение в дробилке. Далее они были просеяны на ситах 0–0,315(1), 0,315–0,63(2), 0,63–1,25(3), 1,25–2,5(4) для выделения однородных фракций. Перед проведением исследований сорбционных характеристик было важно определить химический состав и структуру исследуемого материала. Изучение химического состава осуществлялось методом рентгенофлуоресцентного анализа, который позволил выявить содержание основных элементов, таких как SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O и K_2O . Рентгенофазовый анализ был осуществлен с использованием дифрактометра модели D8- ADVANCE производства компании Bruker, работающем в монохроматическом $\text{CuK}\alpha$ -излучении ($\lambda=1,54 \text{ \AA}$). Были зарегистрированы характерные рефлексы, соответствующие карбонату кальция (CaCO_3) и дикальцийсиликату (белиту/ларниту, Ca_2SiO_4), являющимся доминирующими компонентами шлака. Присутствие небольшого количества ранкинита ($\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$) подтверждено дополнительными характеристиками рентгенограммы. Полученные данные представлены в графической форме (рис. 1), иллюстрирующей состав исследуемого нефелинового шлама. В составе шлама зафиксировано присутствие слабых дифракционных линий, соответствующих соде, а именно термонатриту. Анализ структуры кристаллических фаз выявил высокие уровни дисперсности и мелкокристалличности, что способствует ускоренному взаимодействию и образованию новых поверхностных комплексов, повышающих сорбционную емкость материала. Важно отметить, что нефелиновый шлам характеризуется высоким уровнем щелочности, что свидетельствует о значительной нейтрализующей способности данных отходов Ачинского глиноземного комбината.

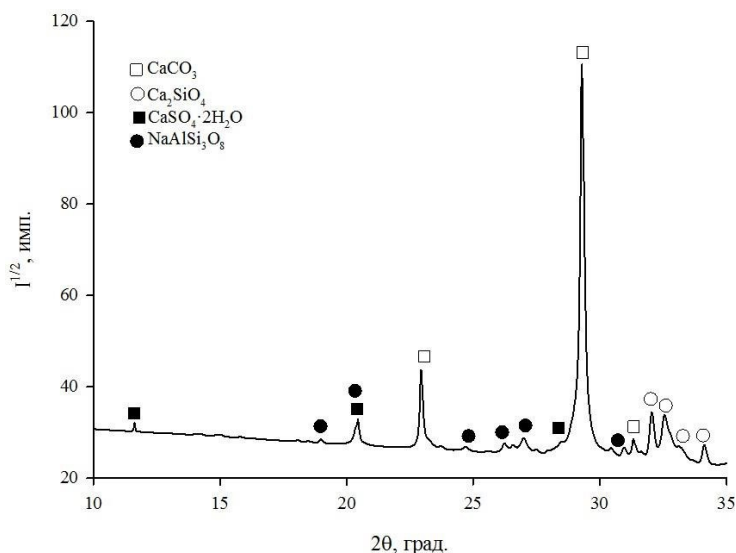


Рис. 1. Дифрактограмма нефелинового шлама
Fig. 1. Diffraction pattern of nepheline sludge

Научно-исследовательская лаборатория Центра коллективного пользования Сибирского федерального университета специализируется на проведении комплексных анализов материалов различного происхождения. В рамках данной работы проводилось подробное электронно-микроскопическое исследование нефелинового шлама, предназначенного для оценки его потенциальных качеств как сорбента для очистки промышленных сточных вод. Использование современного сканирующего электронного микроскопа позволило получить уникальные электронные снимки (рис. 2), дающие полное представление о структуре и характеристиках поверхности материала. Полученные изображения демонстрируют подробную микроструктуру, указывая на важную особенность – пористую природу материала. Такая структура играет решающую

роль в увеличении общей доступной поверхности, обеспечивая максимальное взаимодействие между материалом и молекулами растворенных веществ. Исследования показали, что средний размер частиц нефелинового шлама находится в пределах приблизительно 5 мкм. Небольшой размер частиц облегчает проникновение ионных соединений внутрь материала, что значительно ускоряет процесс сорбции и способствует повышению эффективности очистки. Поверхность материала покрыта множеством небольших трещин и пор, создавая оптимальные условия для проникновения молекул растворенных ионов внутрь структуры. Подобная структура образует своего рода лабиринты, способствующие лучшему взаимодействию сорбента с растворенными соединениями, повышая общую емкость материала для захвата загрязнений.

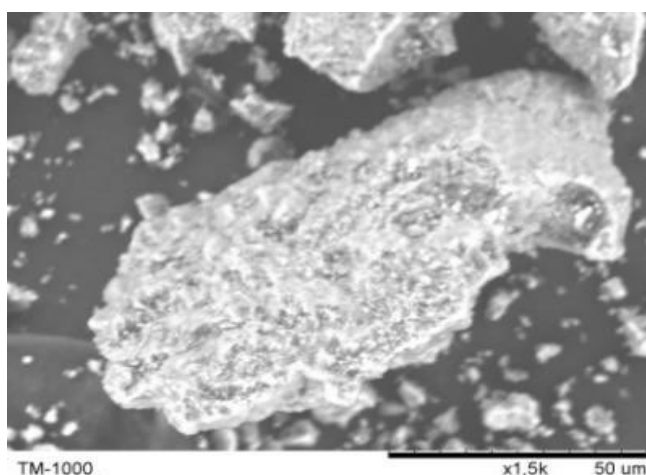


Рис. 2. Микроструктура частиц нефелинового шлама
Fig. 2. Microstructure of nepheline slurry particles

Проведенное исследование продемонстрировало значительную открытость и рыхлость поверхности, что объясняется особенностями молекулярной структуры самого материала. Открытая структура создает идеальное условие для быстрого распространения и фиксации растворенных примесей, улучшая общий эффект сорбции [26, 27].

Таким образом, электронно-микроскопическое исследование подтверждает перспективность использования нефелинового шлама в качестве экономически целесообразного и экологически безопасного сорбента для очистки промышленных сточных вод.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Природный карбонат кальция известен своей способностью к адсорбции, что позволяет ему извлекать ионы цветных и тяжелых металлов из водных сред [28, 29]. Механизмы адсорбции на поверхности карбоната кальция характеризуются формированием особых сложнорастворимых соединений, таких как гидроксидные формы и основные соли, а также карбонатные и гидрокарбонатные комплексы тяжелых металлов [30]. Именно эта особенность придает карбонату кальция особое значение в области очищения сточных вод от вредных примесей. Удаление тяжелых металлов осуществляется за счет специфических реакций ионного обмена [32], в которых атомы металла замещают катионы кальция в структуре минерала. В результате такого обмена формируется новый твердый осадок, представляющий собой сложную смесь солей и гидроксокомплексов.

Процесс сопровождается постепенной заменой ионов кальция ионами тяжелых металлов, вызывая рекристаллизацию карбоната кальция и формирование стабильных, практически нерастворимых осадков, закрепляющих вредные вещества внутри твердой матрицы.

Адсорбционные свойства карбоната кальция обусловлены наличием на его поверхности многочисленных активных центров, способных притягивать и удерживать металлические ионы, обеспечивая надежное и быстрое удаление токсичных примесей из жидких сред [31, 32]. Помимо непосредственного адсорбирования, важное значение имеют также процессы образования межфазных барьеров, препятствующих высвобождению металлов обратно в раствор.

Следовательно, именно сочетание уникальных физических и химических свойств карбоната кальция определяет его исключительную пригодность в качестве высокопроизводительного сорбента для глубокой очистки воды от широкого спектра ионов тяжелых и цветных

металлов и обеспечения устойчивого уровня защиты окружающей среды и здоровья населения.

Сорбционная активность разрабатываемых материалов была изучена в лабораторных условиях с применением современных аналитических приборов и оборудования, позволяющего точно измерять показатели сорбции и анализировать структуру поверхности образцов.

Изученный исследовательский опыт показывает, что предварительная обработка нефелинового шлама, такая как активация кислотами или термическая обработка, может значительно улучшить его сорбционные свойства. Активация приводит к увеличению удельной поверхности материала и образованию активных центров, способных эффективно связывать ионы Cr(VI).

Кроме того, модификация нефелинового шлама различными реагентами, например органическими аминами, позволяет повысить его селективность по отношению к Cr(VI) в присутствии других загрязняющих веществ.

В данной работе с целью повышения сорбционной активности и оптимизации эксплуатационных характеристик проводилась термическая активация сорбента, изготовленного из нефелинового шлама.

Полученные данные рентгенофазового анализа и атомно-эмиссионной спектроскопии позволили установить преобладание алюмосиликатных фаз, что обусловило выбор термической активации как метода модификации структуры.

Процесс термической активации осуществлялся в муфельной печи при температуре 1000 °C и продолжительностью выдержки один час.

После активации сорбента был проведен лабораторный эксперимент по оценке эффективности очистки сточной воды, содержащей ионы шестивалентного хрома (Cr(VI)). Исследование проводилось с использованием модельного раствора, соответствующего условиям реальных промышленных процессов, чтобы обеспечить максимальную репрезентативность результатов.

Концентрации ионов хрома измерялись с помощью спектрофотометрии и атомно-абсорбционной спектроскопии как до начала процесса сорбции, так и после завершения эксперимента. Перед началом опытов вода имела определенную начальную концентрацию ионов Cr(VI), соответствующую уровню загрязнений, характерному для гальванических производств.

Результаты представлены в таблице.

Результаты очистки хромсодержащих стоков сорбентом, полученным из нефелинового шлама
Results of chromium-containing wastewater treatment using a sorbent obtained from nepheline sludge

Фракция сорбента	$C_{исх}^{Cr^{6+}}$, мг/дм ³	pH _{исх}	$C_{ост}^{Cr^{3+}}$, мг/дм ³	pH _{ост}
0,00	60	2,659	0,0704	11,83
0,16	60	2,659	0,2412	11,82
0,315	60	2,659	0,0956	11,81
0,63	60	2,659	0,2876	11,86

Полученные результаты подтвердили высокую способность сорбентов, полученных из нефелинового шлама, эффективно очищать воду.

Определение качественного и количественного состава загрязняющих веществ, содержащихся как в исходной воде, так и в фильтрате после прохождения через сорбент, проводилось с использованием комплекса стандартных методов химического анализа.

Применяемые методы позволяли получить точные и надежные данные о природе и концентрации примесей, влияющих на эффективность процесса очистки.

Повышение значений pH, после сорбционной очистки хромсодержащих сточных вод термически обработанным нефелиновым шламом, объясняется несколькими важными причинами: во-первых, термическая обработка нефелинового шлама вызывает изменения в его кристаллической решетке и активирует поверхность материала, делая его более пористым и увеличивая площадь соприкосновения с водой.

Основной причиной повышения pH является наличие щелочных и щелочноземельных элементов (например, оксида кальция CaO, оксида магния MgO) в составе шлама. После термообработки эти вещества вступают в реакцию с водой, выделяя гидроксид-ионы (OH⁻).

Во-вторых, во время сорбции ионов шестивалентного хрома (CrVI) на поверхности нефелинового шлама происходят химические реакции, сопровождающиеся обменом ионами водорода (H⁺) на катионные группы (такие как кальций, магний).

Часть протонов (H⁺), присутствующих в водном растворе, нейтрализуются активными центрами сорбента, что также способствует росту pH.

Неконтролируемые поверхностные реакции на активных центрах обработанного шлама приводят к освобождению свободных гидроксид-ионов (OH⁻), взаимодействующих с водой и уменьшающих концентрацию кислых

ионов (H⁺). Это явление называется буферизацией среды и характерно для многих минеральных сорбентов, используемых в практике водоочистки. Эти факторы обеспечивают эффективное изменение pH среды, что важно учитывать при проектировании и внедрении технологий очистки сточных вод с использованием термически обработанного нефелинового шлама.

Результат глубокой сорбционной очистки хромсодержащих сточных вод термически обработанным нефелиновым шламом обусловлен несколькими взаимосвязанными факторами:

1. Тепловая обработка нефелинового шлама вызывает фазовые превращения и реструктуризацию материала. Происходит дегидратация, декомпозиция карбонатов и аморфизация минерала, что приводит к образованию активной пористой структуры с развитой удельной площадью поверхности. Образование мезо- и макропор облегчает проникновение ионов хрома внутрь гранул шлама, обеспечивая более полное взаимодействие и усиленную сорбцию.

2. После термического нагрева образуется большое количество активных центров на поверхности шлама, таких как кислородные анионы и свободные радикалы. Эти центры способны притягивать и удерживать положительно заряженные ионы хрома, создавая прочные связи типа ионного обмена или хемосорбции. Дополнительно образуются гидроксидные комплексы, участвующие в образовании координационных связей с ионами хрома.

3. Природная щелочность обрабатываемого шлама (наличие кальция, магния, натрия) смягчает неблагоприятные эффекты кислой среды, характерные для хромсодержащих сточных вод. Щелочь, выделяемая в ходе реакций, нейтрализует избыток ионов водорода, поддерживая оптимальный диапазон pH для максимальной сорбции.

Высокая эффективность сорбционной очистки хромсодержащих сточных вод предварительно активированного сорбента обусловлена совместным действием изменений в

структуре и морфологии материала, наличием большого числа активных центров, сильными межмолекулярными взаимодействиями и благоприятным влиянием теплового преобразования на физические и химические свойства шлама.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог проведенным исследованиям, можно уверенно утверждать, что использование отходов, богатых кальцием, таких как нефелиновый шлам, возникший в процессе добычи и переработки нефелиновых руд, представляет собой одно из наиболее перспективных решений в области разработки дешевых и надежных методов очистки промышленных сточных вод, содержащих опасные химические вещества, в первую очередь шестивалентный хром (Cr(VI)).

Преимущество предлагаемого подхода заключается в наличии огромных объемов нефелинового шлама, остающегося в виде побочных продуктов на предприятиях глиноземной промышленности. Активное вовлечение этих отходов в производство сорбентов решает сразу несколько важных задач. Во-первых, решается проблема накопления больших объемов шлама, что снижает нагрузку на окружающую среду и уменьшает затраты на утилизацию. Во-вторых, создаются принципиально новые способы очистки сточных вод, доступные для массового внедрения и способные существенно уменьшить уровень опасности сбрасываемых в окружающую среду стоков.

Предложенная методика очистки основывается на принципах сорбции ионообменных процессов, где активное участие принимает кальций, содержащийся в структуре шлама. Кальций вступает в реакцию с ионами хрома, образуя малорастворимые и прочные соединения, эффективно устраняя загрязнение из водного потока.

Применение подобного сорбента оказывается эффективным не только с точки зрения технического результата, но и экономической выгоды, поскольку стоимость изготовления такого сорбента невелика, а сам процесс доступен для любого производственного предприятия.

Особое внимание применению такого подхода следует уделить предприятиям, расположенным в регионах с высоким уровнем развития горнорудной и добывающей отраслей, где опасность загрязнения водных ресурсов особенно велика.

Широкомасштабное внедрение подобной технологии способно значительно улучшить ситуацию с качеством воды, снизив риск попадания токсичных веществ в реки и водоемы, защищая как экосистемы, так и здоровье жителей прилегающих территорий.

Таким образом, данное исследование демонстрирует огромный потенциал нефелинового шлама как основного компонента экологически чистого и экономически оправданного способа борьбы с опасным загрязнением водных ресурсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Степанова М.Л., Маркелов Н.А., Гафаров М.Ш., Мейланова М.Н., Васильева М.Н., Никифорова Э.М. и др. Комплексное использование нефелинового шлама в производстве строительных материалов // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 3-1. С. 77–82. EDN: ZLEZPF.
2. Самигуллина Л.М. Современные технологии утилизации нефтешламов // Молодой ученый. 2022. № 22. С. 616–618. EDN: AJNQYD.
3. Афанасьев С.В., Кравцова М.В., Паис М.А., Носарев Н.С. Анализ методов переработки нефтешламов. Проблемы и решения // Инновации и «зеленые» технологии. Вторая Всеросс. науч.-практ. конф. (г. Тольятти, 19 апреля 2019 г.). Тольятти, 2019. С. 22–27. EDN: ZGEORU.
4. Шепелев И.И., Бочков Н.Н., Головных Н.В., Сахачев А.Ю. Химико-технологические особенности ресурсосберегающих процессов при утилизации твердых отходов металлургического производства // Известия высших учебных заведений. Серия: химия и химическая технология. 2015. Т. 58. № 1. С. 81–86. EDN: TOUHXV.
5. Шепелев И.И., Сахачев А.Ю., Александров А.В., Головных Н.В., Жижаяев А.М., Алгебраистова Н.К. Технологические испытания процессов спекания и выщелачивания нефелиновых шихт со шлаком ферротитанового производства // Естественные и технические науки. 2017. № 10. С. 80–84. EDN: ZRZWHD.
6. Шепелев И.И., Жижаяев А.М., Бочков Н.Н. Применение отходов глиноземного производства с целью улучшения эксплуатационных свойств дорожных смесей // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 1. С. 182–193. EDN: THSFNR.
7. Закупень Т.В. Институциональные основы и перспективы формирования промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства в рамках концепции устойчивого развития экономики // Экономика, предпринимательство и право. 2023. Т. 13. № 6. С. 1943–1962. <https://doi.org/10.18334/epp.13.6.117836>. EDN: WIGLGK.

8. Бурматова О.П. Экологические вызовы в регионах: анализ, пути предотвращения рисков и снижения угроз // Экономика региона. 2021. Т. 17. № 1. С. 249–261. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-1-19>. EDN: UFYYJD.
9. Карачева М.А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения вод (обзор) // Исследования молодых ученых. Материалы XLIX Междунар. науч. конф. (г. Казань, 20–23 декабря 2022 г.). Казань, 2022. С. 5–7. EDN: TTCDFJ.
10. Петухова Ю.Н., Ильина С.И., Фурсенко А.В., Носырев М.А. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов с помощью сорбентов // Евразийский союз ученых. 2019. № 7. С. 51–54. <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.6.64.254>.
11. Власенко Д.А. Новый тип сорбента на основе лигнина и винилиденхлорида для очистки сточных вод от соединений тяжелых металлов // Химия и химическая технология в XXI веке. Материалы XX Междунар. науч.-практ. конф. им. профессора Л.П. Кулева студентов и молодых ученых (г. Томск, 20–23 мая 2019 г.). Томск, 2019. С. 455–456. EDN: JSAGKC.
12. Jin Yang, Peng Jiang, Meimei Zheng, Jieyu Zhou, Xiao Liu Investigating the Influencing Factors of Incentive-Based Household Waste Recycling Using Structural Equation Modelling // Waste Management. 2022. Vol. 142. P. 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.014>.
13. Sharma P., Singh S.P., Parakh S.K., Yen Wah Tong Health Hazards of Hexavalent Chromium (Cr (VI)) and Its Microbial Reduction // Bioengineered. 2022. Vol. 13. Iss. 3. P. 4923–4938. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2037273>.
14. Udriou I., Sgura A., Vignoli L., Bologna M.A., D'Amen M., Salvi D. et al. Micronucleus Test on Triturus Carnifex as a Tool for Environmental Biomonitoring // Environmental and Molecular Mutagenesis. 2015. Vol. 56. Iss. 4. P. 412–417. <https://doi.org/10.1002/em.21914>.
15. Ferrier V., Gauthier L., Zoll-Moreux C., L'Haridon J. Genotoxicity Tests in Amphibians – A Review // Microscale Testing in Aquatic Toxicology. Florida: CRC Press, 1997. P. 507–519. <https://doi.org/10.1201/9780203747193-35>.
16. Мамедова Р.И., Чантаева А.С. Влияние хрома (VI) на окружающую среду и здоровье: технологии очистки сточных вод // Вестник науки. 2024. Т. 3. № 11. С. 1301–1309. EDN: TRNMGF.
17. Печищева Н.В., Ординарцев Д.П., Валеева А.А., Зайцева П.В., Корибицына А.Д., Сушникова А.А. и др. Адсорбция Cr(VI) наноразмерным рутилом под действием ультрафиолетового излучения // Журнал физической химии. 2023. Т. 97. № 2. С. 279–284. <https://doi.org/10.31857/S0044453723020206>. EDN: EJJXZIO.
18. Teutli-Sequeira A., Solache-Rios M., Martinez-Miranda V., Linares-Hernandez I. Comparison of Aluminum Modified Natural Materials in the Removal of Fluoride Ions // Journal of Colloid and Interface Science. 2014. Vol. 418. P. 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.12.020>.
19. Bo Liu, Junxiang Lu, Yu Xie, Bin Yang, Xiaoying Wang, Runcang Sun Microwave-Assisted Modification on Montmorillonite with Ester-Containing Gemini Surfactant and its Adsorption Behavior for Triclosan // Journal of Colloid and Interface Science. 2014. Vol. 418. P. 311–316. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.12.035>.
20. Шубин И.Л., Бакаева Н.В., Калайдо А.В. Перспективы использования природных минеральных сорбентов в водоочистке и водоподготовке // Экология урбанизированных территорий. 2025. № 1. С. 96–103. <https://doi.org/10.24412/1816-1863-2025-1-96-103>. EDN: IOBGRO.
21. Федорова С.А., Магдыч Е.А., Акимов А.М., Кравчук А.А. Очистка сточных вод от ионов никеля (II) термически модифицированными природными сорбентами // Энергетические установки и технологии. 2020. Т. 6. № 4. С. 124–130. EDN: GXCFFM.
22. Saleh T.A. Protocols for Synthesis of Nanomaterials, Polymers, and Green Materials as Adsorbents for Water Treatment Technologies // Environmental Technology & Innovation. 2021. Vol. 24. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101821>.
23. Jain A., Kumari S., Agarwal S., Khan S. Water Purification via Novel Nano-Adsorbents and Their Regeneration Strategies // Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 152. P. 441–454. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.031>.
24. Da Liu, Wenyi Gu, Liang Zhou, Lingzhi Wang, Jinlong Zhang, Yongdi Liu et al. Recent Advances in MOF-Derived Carbon-Based Nanomaterials for Environmental Applications in Adsorption and Catalytic Degradation // Chemical Engineering Journal. 2022. Vol. 427. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131503>.
25. Choudhary V., Vellingiri K., Philip L. Potential Nanomaterials-Based Detection and Treatment Methods for Aqueous Chloroform // Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 2021. Vol. 16. P. 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100487>.
26. Дударев В.И., Кокконова Ю.И., Дударев Д.И. Изучение пористой структуры углеродных сорбентов // Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение. Электронный ресурс. Материалы V Междунар. науч.-практ. конф. (г. Тамбов, 12–13 октября 2023 г.). Тамбов, 2023. С. 408–411. EDN: LMFTPY.

27. Левшенков В.Н., Волочаева И.А. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ состава вещества // Инновационные направления развития в образовании, экономике, технике и технологиях. Национальная с междунар. участием науч.-практ. конф., посвященная 25-летию Технологического института сервиса (филиала) ДГТУ в г. Ставрополе (г. Ставрополь, 04–05 июня 2024 г.). Ставрополь, 2024. С. 508–511. EDN: GFNWBL.
28. Куковерова В.С., Кондрашова А.В. Адсорбционные исследования природного сорбента // Инновационное развитие сельского хозяйства и актуальные подходы к подготовке кадров для АПК. Сб. статей V национальной науч.-практ. конф. (г. Саратов, 18 августа 2023 г.). Саратов, 2023. С. 107–111. EDN: YOGEOA.
29. Шершнева М.В. Современные сорбенты для очистки поверхностных и сточных вод от ионов тяжелых металлов // Естественные и технические науки. 2024. № 9. С. 54–56. EDN: UXKUOW.
30. Воронова М.И., Суров О.В., Лебедева Е.О., Рублева Н.В., Афинецкий А.В., Захаров А.Г. Минерализация карбоната кальция в композитах поликапролактона с нанокристаллической целлюлозой: структура, морфология и сорбционные свойства // Журнал неорганической химии. 2021. Т. 66. № 12. С. 1779–1791. <https://doi.org/10.31857/S0044457X21120217>. EDN: OZPUO.
31. Морозова А.Г., Лонзингер Т.М., Скотников В.А., Судариков М.В., Лонзингер П.В., Морозов А.П. Влияние химической предыстории сорбента-минерализатора на процесс его карбонизации в водных средах // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Химия. 2023. Т. 15. № 2. С. 116–124. <https://doi.org/10.14529/chem230211>. EDN: RTIVHK.
32. Лонзингер Т.М., Морозова А.Г. Неорганические сорбенты для очистки воды на основе алюмосиликатов магния и кальция // Современные материалы и методы решения экологических проблем постиндустриальной агломерации. Сб. материалов I Всеросс. науч.-практ. конф. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2024. С. 70–75. EDN: JZJRDL.

REFERENCES

1. Stepanova M.L., Markelov N.A., Gafarov M.Sh., Meylanova M.N., Vasileva M.N., Nikiforova E.M. et al. Complex Use of Nepheline Sludge in the Production of Building Materials. *Modern High Technologies*. 2019;3-1:77-82. (In Russ.). EDN: ZLEZPF.
2. Samigullina L.M. Modern Technologies for Oil Sludge Disposal. *Molodoi uchenyi*. 2022;22:616-618. (In Russ.). EDN: AJNQYD.
3. Afanasyev S.V., Kravtsova M.V., Pais M.A., Nosarev N.S. Analysis of Methods Processing of Oil Hits. Problems and Solutions. In: *Innovatsii i «zelenye» tekhnologii. Vtoraya Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya = Innovations and Green Technologies. Second All-Russian Scientific and Practical Conference*. 19 April 2019, Tolyatti. Tolyatti; 2019. P. 22–27. (In Russ.). EDN: ZGEORU.
4. Shepelev I.I., Bochkov N.N., Golovnykh N.V., Sakhachev A.Yu. Chemical and Technological Features of Resource-Saving Processes in the Disposal of Solid Waste from Metallurgical Production. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2015;58(1):81-86. (In Russ.). EDN: TOUHXV.
5. Shepelev I.I., Sakhachev A.Yu., Aleksandrov A.V., Golovnykh N.V., Zhizhaev A.M., Algebraistova N.K. Technological Testing of the Processes of Sintering and Leaching Nepheline Batches with Slag from Ferro-titanium Production. *Natural and Technical Sciences*. 2017;10:80-84. (In Russ.). EDN: ZRZWHI.
6. Shepelev I.I., Zhizhaev A.M., Bochkov N.N. Alumina Production Waste Used to Improve Inorganic Cement Service Properties. *Journal of Construction and Architecture*. 2015;1:182-193. (In Russ.). EDN: THSFNR.
7. Zakupen T.V. Institutional Framework and Perspectives of the Industry for Processing, Recycling and Neutralization of Industrial Waste within Sustainable Economic Development. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. 2023;13(6):1943-1962. (In Russ.). <https://doi.org/10.18334/epp.13.6.117836>. EDN: WIGLGK.
8. Burmatova O.P. Environmental Challenges in Regions: Analysis and Measures to Reduce Potential Risks. *Economy of Region*. 2021;17(1):249-261. (In Russ.). <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2021-1-19>. EDN: UFYYJD.
9. Karacheva M.A. Heavy Metals as a Factor in Water Pollution (Review). In: *Issledovaniya molodykh uchenykh. Materialy XLIX Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii = Research of Young Scientists. Proceedings of the XLIX International Scientific Conference*. 20–23 December 2022, Kazan. Kazan; 2022. P. 5–7. (In Russ.). EDN: TTCDFJ.
10. Petukhova Yu.N., Ilyina S.I., Fursenko A.V., Nosyrev M.A. Purification of Wastewater from Heavy Metal Ions Using Sorbents. *Eurasian Union of Scientists*. 2019;7:51-54. (In Russ.). <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.6.64.254>.
11. Vlasenko D.A. A New Type of Sorbent Based on Lignin and Vinylidene Chloride for Wastewater Treatment from Heavy Metal Compounds. In: *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya v XXI veke. Materialy XX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii imeni professora L.P. Kuleva studentov i molodykh uchenykh = Chemistry and Chemical Technology in the XXI Century. Proceedings of the XX International scientific and*

- Practical Conference named after Professor L.P. Kulev of Students and Young Scientists.* 20–23 May 2019, Tomsk. Tomsk; 2019. P. 455–456. (In Russ.). EDN: JSAGKC.
12. Jin Yang, Peng Jiang, Meimei Zheng, Jieyu Zhou, Xiao Liu Investigating the Influencing Factors of Incentive-Based Household Waste Recycling Using Structural Equation Modelling. *Waste Management*. 2022;142:120-131. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.014>.
13. Sharma P., Singh S.P., Parakh S.K., Yen Wah Tong Health Hazards of Hexavalent Chromium (Cr (VI)) and Its Microbial Reduction. *Bioengineered*. 2022;13(3):4923-4938. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2037273>.
14. Udriou I., Sgura A., Vignoli L., Bologna M.A., D'Amen M., Salvi D. et al. Micronucleus Test on *Triturus Carnifex* as a Tool for Environmental Biomonitoring. *Environmental and Molecular Mutagenesis*. 2015;56(4):412-417. <https://doi.org/10.1002/em.21914>.
15. Ferrier V., Gauthier L., Zoll-Moreux C., L'Haridon J. Genotoxicity Tests in Amphibians – A Review. *Microscale Testing in Aquatic Toxicology*. Florida: CRC Press, 1997. P. 507–519. <https://doi.org/10.1201/9780203747193-35>.
16. Mammadova R.I., Chantayeva A.S. Effects Of Chromium (VI) On Environment and Health: Wastewater Treatment Technologies. *Vestnik nauki*. 2024;3(11):1301-1309. (In Russ.). EDN: TRNMGF.
17. Pechishcheva N.V., Ordinartsev D.P., Valeeva A.A., Zaitseva P.V., Korobitsyna A.D., Sushnikova A.A. et al. Adsorption of Cr(VI) by Nanosized Rutile under Ultraviolet Irradiation. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 2023;97(2):279-284. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044453723020206>. EDN: EJXZIO.
18. Teutli-Sequeira A., Solache-Rios M., Martinez-Miranda V., Linares-Hernandez I. Comparison of Aluminum Modified Natural Materials in the Removal of Fluoride Ions. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2014;418:254-260. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.12.020>.
19. Bo Liu, Junxiang Lu, Yu Xie, Bin Yang, Xiaoying Wang, Runcang Sun Microwave-Assisted Modification on Montmorillonite with Ester-Containing Gemini Surfactant and its Adsorption Behavior for Triclosan. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2014;418:311-316. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.12.035>.
20. Shubin I.L., Bakaeva N.V., Kalaydo A.V. Prospects for Using Natural Mineral Sorbents in Water Treatment. *Ecology of Urban Areas*. 2025;1:96-103. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1816-1863-2025-1-96-103>. EDN: IOBGRO.
21. Fedorova S.A., Magdych E.A., Akimov A.M., Kravchuk A.A. Purification of Waste Water from Nickel Ions (II) by Thermally Modified Natural Sorbents. *Ehnergeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2020;6(4):124-130. (In Russ.). EDN: GXCFHM.
22. Saleh T.A. Protocols for Synthesis of Nanomaterials, Polymers, and Green Materials as Adsorbents for Water Treatment Technologies. *Environmental Technology & Innovation*. 2021;24:1-18. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101821>.
23. Jain A., Kumari S., Agarwal S., Khan S. Water Purification via Novel Nano-Adsorbents and Their Regeneration Strategies. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021;152:441-454. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.031>.
24. Da Liu, Wenyi Gu, Liang Zhou, Lingzhi Wang, Jinlong Zhang, Yongdi Liu et al. Recent Advances in MOF-Derived Carbon-Based Nanomaterials for Environmental Applications in Adsorption and Catalytic Degradation. *Chemical Engineering Journal*. 2022;427:1-19. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131503>.
25. Choudhary V., Vellingiri K., Philip L. Potential Nanomaterials-Based Detection and Treatment Methods for Aqueous Chloroform. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2021;16:1-20. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100487>.
26. Dudarev V.I., Kokonova U.I., Dudarev D.I. Study of the Porous Structure of Carbon Sorbents. In: *Grafen i rodstvennyye struktury: sintez, proizvodstvo i primeneniye. Ehlektronnyi resurs. Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Graphene and Related Structures: Synthesis, Production, and Application. Electronic resource. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*. 12–13 October 2023, Tambov. Tambov; 2023. P. 408–411. (In Russ.). EDN: LMFTPY.
27. Levshenkov V.N., Volochaeva I.A. X-Ray Spectral Fluorescence Analysis of the Composition of the Substance. In: *Innovatsionnye napravleniya razvitiya v obrazovanii, ehkonomie, tekhnike i tekhnologiyakh. Natsionalnaya s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 25-letiyu Tekhnologicheskogo instituta servisa (filiala) DGTU v g. Stavropole = Innovative Development Trends in Education, Economics, Engineering, and Technology. National Scientific and Practical Conference with International Participation Dedicated to the 25th Anniversary of the Technological Institute of Service (Branch) of DSTU in Stavropol*. 04–05 June 2024, Stavropol. Stavropol; 2024. P. 508–511. (In Russ.). EDN: GFNWBL.
28. Kukoverova V.S., Kondrashova A.V. Adsorption Investigations of Natural Sorbent. In: *Innovatsionnoe razvitiye selskogo khozyaistva i aktualnye podkhody k podgotovke kadrov dlya APK. Sbornik statei V natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Innovative Development of Agriculture and Current Approaches to Training Personnel for the Agro-Industrial Complex. Collection of Articles from the V National Scientific and Practical Conference*. 18 August 2023, Saratov. Saratov; 2023. P. 107–111. (In Russ.). EDN: YOGEO.

29. Shershneva M.V. Modern Sorbents for Purification of Surface and Waste Water from Heavy Metal Ions. *Natural and Technical Sciences*. 2024;9:54-56. (In Russ.). EDN: UXKUOW.
30. Voronova M.I., Surov O.V., Rubleva N.V., Zakharov A.G., Lebedeva E.O., Afineevskii A.V. Calcium Carbonate Mineralization in Polycaprolactone Composites with Nanocrystalline Cellulose: Structure, Morphology, and Adsorption Properties. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2021;66(12):1779-1791. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044457X21120217>. EDN: OOPZPU.
31. Morozova A.G., Lonzing T.M., Skotnikov V.A., Sudarikov M.V., Lonzing P.V., Morozov A.P. Influence of the Chemical Prehistory of the Sorbent-Mineralizer on the Process of its Carbonization in Aqueous Environments. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chemistry*. 2023;15(2):116-124. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/chem230211>. EDN: RTIVHK.
32. Lonzing T.M., Morozova A.G. Inorganic Sorbents for Water Purification Based on Magnesium and Calcium Aluminosilicates. In: *Modern Materials and Methods for Solving Environmental Problems of Post-Industrial Agglomeration. Collection of Materials from the 1st All-Russian Scientific and Practical Conference*. Chel-yabinsk: South Ural State University, 2024. P. 70–75. (In Russ.). EDN: JZJRD.

Информация об авторах

Бобрик Анастасия Геннадьевна,
старший преподаватель кафедры инженерных
систем зданий и сооружений,
Сибирский федеральный университет,
Инженерно-строительный институт,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82,
Россия,
✉ e-mail: abobrik@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7020-9924>
Author ID: 883848

Матюшенко Анатолий Иванович,
д.т.н, профессор, заведующий кафедрой
инженерных систем зданий и сооружений,
Сибирский федеральный университет,
Инженерно-строительный институт,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82,
Россия,
e-mail: amatyushenko@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0009-0004-3182-5838>
Author ID: 380200

Information about the authors

Anastasia G. Bobrik,
Senior Lecturer at the Department of Engineering
Systems of Buildings and Structures,
Siberian Federal University,
School of Engineering and Construction,
82 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041,
Russia,
✉ e-mail: abobrik@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7020-9924>
Author ID: 883848

Anatoly I. Matyushenko,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department
of Engineering Systems of Buildings and Structures,
Siberian Federal University,
School of Engineering and Construction,
82 Svobodny Ave., Krasnoyarsk 660041,
Russia,
e-mail: amatyushenko@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0009-0004-3182-5838>
Author ID: 380200

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and ap-proved
by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 03.09.2025.
Одобрена после рецензирования 06.10.2025.
Принята к публикации 20.10.2025.

Information about the article

The article was submitted 03.09.2025.
Approved after reviewing 06.10.2025.
Accepted for publication 20.10.2025.