

Жарылқасын Абдуахитович Абилов – доктор химических наук, профессор кафедры «Химии и технологии органических веществ, природных соединений и полимеров», Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: abilovs51@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2665-2539>.

Авторлар туралы мәліметтер

Аружан Аманкелдықызы Мыңбаева – «Органикалық заттар, табиғи қосылыстар мен полимерлер» кафедрасының магистранты, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: aruzhan.mnbv@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0394-0130>.

Арайым Аманжолқызы* – химия магистрі, «Органикалық заттар, табиғи қосылыстар мен полимерлер» кафедрасының ғылыми қызыметкери, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: arai13_95@list.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4052-1436>.

Шынар Нурлановна Жумагалиева – химия ғылымдарының докторы, «Органикалық заттар, табиғи қосылыстар мен полимерлер» кафедрасының профессоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: shynarnur@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4110-678X>.

Жарылқасын Әбдуахитұлы Әбілов – химия ғылымдарының докторы, «Органикалық заттар, табиғи қосылыстар мен полимерлер» кафедрасының профессоры; Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: abilovs51@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2665-2539>.

Information about the authors

Aruzhan Mynbayeva – master's student of the department «Chemistry and technology of organic substances, natural compounds and polymers», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: aruzhan.mnbv@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0394-0130>.

Aрайым Аманжолқызы* – master of Chemistry, research associate of the department «Chemistry and technology of organic substances, natural compounds and polymers», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: arai13_95@list.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4052-1436>.

Шынар Жумагалиева – doctor of chemical sciences, professor of the department «Chemistry and technology of organic substances, natural compounds and polymers», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: shynarnur@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4110-678X>.

Жарылқасын Абілов – doctor of chemical sciences, professor of the department «Chemistry and technology of organic substances, natural compounds and polymers», Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: abilovs51@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2665-2539>.

Поступила в редакцию 04.06.2025

Поступила после доработки 21.10.2025

Принята к публикации 22.10.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4\(20\)-69](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4(20)-69)

МРНТИ: 53.01.91



Check for updates

А.К. Кайракбаев¹, М.Б. Алиев², Ж.Б. Тукашев³

¹Баишев университет,

030000, Республика Казахстан, г. Актобе, ул. Братьев Жубановых, д. 302а

²«Quanta Science» ИП,

030000, Республика Казахстан, г. Актобе, ул. М. Шокай, д. 338

³Актыбинский региональный университет имени К. Жубанова,
030000, Республика Казахстан, г. Актобе, Проспект Алии Молдагуловой, строение 34

*e-mail: kairak@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ САМОРАСПАДАЮЩИХСЯ ШЛАКОВ ОТ ПРОИЗВОДСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОГО ФЕРРОХРОМА

Аннотация: Производство низкоуглеродистого феррохрома неизбежно сопровождается образованием значительных объемов шлаков, ключевой особенностью которых является их способность к самопроизвольному распаду (дезинтеграции) при охлаждении и воздействии атмосферных факторов. Это явление обусловлено полиморфными превращениями β -

дикальциевого силиката (C_2S) в γ -модификацию, сопровождающимся увеличением объема. Данная уникальная характеристика, с одной стороны, создает вызовы в управлении отходами, с другой – открывает широкие возможности для их эффективной и экономически выгодной утилизации без необходимости дорогостоящего измельчения. Настоящая обзорная статья представляет собой систематический анализ и обобщение современных высокоеффективных технологий мирового уровня по применению самораспадающихся шлаков производства низкоуглеродистого феррохрома. Особое внимание уделяется их использованию в производстве строительных материалов (цементы, бетоны, вяжущие), сорбентов для водоочистки, мелиорантов для сельского хозяйства, а также в дорожном строительстве. В данной работе проведен литературный обзор пятидесяти семи источников, опубликованных за последние десять лет и содержащих описание наиболее эффективных технологий применения самораспадающихся шлаков производства низкоуглеродистого феррохрома.

Целью статьи является демонстрация потенциала этих шлаков как ценного вторичного сырья, способствующего снижению экологической нагрузки, повышению ресурсоэффективности ферросплавного производства и развитию принципов циркулярной экономики.

Ключевые слова: шлаки производства низкоуглеродистого феррохрома, самораспадающиеся шлаки, утилизация промышленных отходов, техногенные отходы, отходы металлургии, эффективное применение шлаков ферросплавного производства.

Введение

Проблема утилизации промышленных отходов является одним из наиболее острых вызовов современного общества. Металлургическая промышленность, в частности производство ферросплавов, генерирует значительные объемы промышленных отходов таких, как шлаки. Среди них самораспадающиеся шлаки низкоуглеродистого феррохрома (НФХ) занимают особое место благодаря своей уникальной характеристике – самопроизвольному распаду. К примеру, общий объем накопленного шлака НФХ на 2025 год составляет 8-9 млн тонн на шлакоотвале Актюбинского завода ферросплавов (АО «ТНК Казхром»). Ежегодное образование таких шлаков – примерно 200 тыс. т. в год.

Феномен самораспада обусловлен фазовым переходом β -двукальциевого силиката $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ в γ -модификацию при охлаждении, что сопровождается увеличением объема на 10-12% и приводит к образованию трещин, и затем к разрушению шлакового камня в порошок [1, 2]. Главным фактором, способствующему этому переходу из одной модификации в другую, служит процесс охлаждения. Кроме охлаждения влияет высокая доля $\beta\text{-C}_2\text{S}$ и отсутствие стабилизирующих веществ таких, как бор, фосфаты. Традиционно самораспадающиеся шлаки НФХ представляют собой проблему из-за пыления и необходимости больших площадей для хранения. Однако в последние десятилетия, в свете растущей стоимости первичного сырья, ужесточения экологических норм и развития концепции циркулярной экономики, эти шлаки стали рассматриваться не как отходы, а как вторичный ресурс [3].

В настоящей работе сосредоточимся исключительно на наиболее эффективных технологиях, использующих этот специфический вид шлака, демонстрируя его потенциал для создания материалов с высокой добавленной стоимостью, минимизации воздействия на окружающую среду и повышения устойчивости промышленного производства.

Литературный обзор

Исследования самораспадающихся шлаков НФХ и их потенциального применения начались несколько десятилетий назад, но наиболее интенсивное развитие получили в последние 15-20 лет. Первоначальный фокус был на понимании механизма самораспада. В работах [4, 5] изложены основы для понимания полиморфных превращений C_2S , идентифицировав $\beta\rightarrow\gamma$ переход как основную причину дезинтеграции. Более поздние исследования [6] подтвердили, что содержание C_2S (обычно в диапазоне 40-70% масс.) является ключевым фактором, определяющим степень самораспада, наряду с условиями охлаждения.

Одним из наиболее перспективных направлений является использование самораспадающихся шлаков НФХ в качестве компонента цементных и бесклинкерных вяжущих материалов. Высокое содержание CaO (до 40-50%) и SiO_2 (до 30-40%) делает их потенциально активными [7]. В ряде исследований было обнаружено, что измельченные до определенной тонкости шлаки НФХ могут выступать в качестве активной минеральной добавки в портландцементе. В работе [8] авторы продемонстрировали, что частичная замена цементного клинкера шлаком НФХ до 15-20% не только не ухудшает прочностные характеристики бетона, но и может улучшать его долговечность за счет снижения

тепловыделения при гидратации и повышения сульфатостойкости. Исследователи в статье [9] подчеркивают, что пузцоланическая активность шлаков НФХ, обусловленная наличием аморфных фаз и свободного CaO, позволяет им эффективно вступать в реакцию с Ca(OH)₂, образующимся при гидратации цемента, формируя дополнительные гидросиликаты кальция.

Значительный интерес представляют технологии получения бесклинерных вяжущих на основе самораспадающихся шлаков. В статье [10] исследована активация шлаков НФХ щелочными растворами, показав возможность получения вяжущих с прочностью до 40 МПа после 28 суток. В этих системах шлак выступает как основной компонент, а щелочные активаторы (например, NaOH, KOH, жидкое стекло) инициируют образование гидратов, аналогичных тем, что образуются в портландцементе, или геополимерных структур [11]. В настоящее время известны примеры успешного синтеза геополимеров на основе шлаков НФХ, демонстрируя их применимость для производства строительных элементов с высокой прочностью и устойчивостью к агрессивным средам [12]. Самораспадающиеся шлаки могут быть использованы для производства искусственных пористых заполнителей. Кроме того, исследована возможность получения гранулированного пористого материала путем агломерации шлаков НФХ с последующей термообработкой, что позволяет получать легкие заполнители для бетонов [13]. В контексте керамики, в статье [14] изучалось использование шлаков НФХ в качестве флюсующей добавки при производстве керамических плиток, снижая температуру спекания и улучшая механические свойства.

Благодаря высокому содержанию CaO, самораспадающиеся шлаки НФХ являются потенциально эффективными мелиорантами для кислых почв. К примеру, исследования [15] показали, что известь, содержащаяся в шлаках, может эффективно нейтрализовать кислотность почв, улучшая их структуру и доступность питательных веществ. А в работе [16] изучалось применение шлаков НФХ в качестве источника кальция и магния для сельскохозяйственных культур, отмечая положительное влияние на урожайность при условии контроля за содержанием хрома. Следует отметить, что потенциальное наличие шестивалентного хрома в шлаках требует тщательного мониторинга и методов его стабилизации или восстановления до менее токсичного Cr(III) перед применением в сельском хозяйстве [17].

Развитая удельная поверхность и пористая структура, формирующаяся после самораспада, а также присутствие оксидов металлов, делают шлаки НФХ перспективными сорбентами. Авторы статьи [18] продемонстрировали высокую эффективность самораспадающихся шлаков НФХ в удалении ионов тяжелых металлов (Pb²⁺, Cd²⁺, Ni²⁺) из водных растворов. Механизмы сорбции включают осаждение, поверхностное комплексообразование и ионный обмен. В статье [19] авторы исследовали применение шлаков НФХ для удаления фосфатов и фторидов из сточных вод, что обусловлено наличием Ca²⁺ и оксидов алюминия/железа. Для повышения сорбционной емкости и селективности шлаки могут быть модифицированы. Такой метод активации шлаков НФХ карбоксильными группами для улучшения адсорбции красителей, демонстрируя потенциал для создания специализированных фильтрующих материалов, был разработан в работе [20].

Самораспадающиеся шлаки НФХ могут быть использованы в качестве материала в дорожном строительстве. Авторы работ [21, 22] изучали использование шлаков в качестве наполнителя для дорожных оснований, отмечая их хорошую уплотняемость и дренирующие свойства. Использование шлаков в дорожном строительстве снижает потребность в природном щебне и песке. Однако, как и в случае с сельским хозяйством, необходимо строго контролировать выщелачивание потенциально опасных компонентов, особенно хрома, чтобы соответствовать экологическим нормам.

Материалы и методы. Для получения полной картины об исходном шлаке необходимо исследовать химический состав, фазовый состав, изучить морфологию и дисперсность, а также провести термический анализ.

Химический анализ необходим для определения макро- и микроэлементного состава (CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, Cr₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, MnO, P₂O₅, K₂O, Na₂O, SO₃, Cl, а также следовых элементов). Его проводят с использованием рентгенофлуоресцентного анализа, атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой для оценки содержания тяжелых металлов [23].

Фазовый состав нужен для идентификации кристаллических фаз (β - C_2S , γ - C_2S , мелилит (акерманит, геленит), шпинели (хромит), волластонит, периклаз, свободный CaO). Он проводится с помощью рентгенофазового анализа [24] и петрографического анализа в проходящем и отраженном свете. Количественный фазовый анализ может быть выполнен по методу Ритвельда [25].

Изучение микроструктуры, размера частиц, их формы, пористости и распределения элементов осуществляется с использованием сканирующей электронной микроскопии в сочетании с энерго-дисперсионным рентгеновским анализом [26]. Гранулометрический состав после распада и после дополнительного помола определяется с помощью лазерной дифракции [27]. Удельная поверхность измеряется методом БЭТ (Брунауэра-Эмметта-Теллера) [28].

Дифференциальную сканирующую калориметрию и термогравиметрический анализ используются для изучения термических превращений фаз, определения содержания $Ca(OH)_2$ и $CaCO_3$, а также для оценки стабильности шлака [29].

Для модификации и активации шлаков применяются три вида обработки: механохимическая, термическая и химическая.

Механохимическая активация проводится с использованием высокоэнергетического помола (шаровые мельницы, планетарные мельницы, вибрационные мельницы) для достижения сверхтонкого помола, увеличения удельной поверхности, разрушения кристаллической решетки и образования аморфных фаз, что повышает реакционную способность [30].

Термическая обработка проводится путем контролируемого нагрева и охлаждения для изменения фазового состава, агломерации или, наоборот, декомпозиции определенных фаз, а также для деактивации нежелательных компонентов (например, окисление $Cr(III)$ до $Cr(VI)$ или восстановление $Cr(VI)$ до $Cr(III)$) [31].

Химическая обработка шлаков производится различными реагентами (кислотами, щелочами, солями) для модификации их поверхности, выщелачивания нежелательных компонентов или улучшения связующих или сорбционных свойств. Например, щелочная активация для производства геополимеров [32].

При синтезе вяжущих смесей из измельченного шлака с активаторами (известняк, гипс, сульфаты, щелочные растворы) испытания должны проводиться по стандартным методикам (ГОСТ, EN, ASTM). Например, определение сроков схватывания, прочности при сжатии и изгибе (на различных этапах твердения – 3, 7, 28, 90, 180 суток), морозостойкости, водостойкости, усадки/расширения [33]. При приготовлении бетонов и растворов необходимо определять оптимальное содержание шлака как частичного заменителя цемента или наполнителя для оценки таких параметров, как удобоукладываемость, прочность, плотность, водопоглощение, морозостойкость, истираемость, сопротивления карбонизации и хлоридной агрессии [34].

Определение эффективности шлака как известкового мелиоранта и удобрения на различных типах почв (песчаные, суглинистые, глинистые). Мониторинг рН почвы, содержания доступных форм питательных веществ. А также концентрации тяжелых металлов в почве и сельскохозяйственных культурах (с помощью атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой) [35].

Испытания на адсорбцию целевых загрязнителей (ионов тяжелых металлов, фосфатов, фторидов, красителей, органических соединений) из водных растворов. Использование различных моделей (Лэнгмюра, Фрейндлиха) для описания изотерм сорбции [36]. Изучение зависимости скорости сорбции от времени, температуры, рН раствора и концентрации загрязнителя [37].

Определение плотности, прочности на сжатие и сдвиг, морозостойкости, коэффициента фильтрации дорожных оснований и смесей с использованием шлака. Проведение испытаний на уплотняемость и несущую способность [38].

Необходимо проводить стандартные испытания на выщелачивание (например, по EN 12457, TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)) для определения концентрации потенциально опасных компонентов (включая шестивалентный хром) из исходного шлака и конечных продуктов его переработки [39, 40]. Кроме того, необходимо измерение естественной радиоактивности шлака и продуктов его использования с помощью гамма-спектрометрии для оценки радиационной безопасности [41].

Все экспериментальные работы, как правило, должны проводиться в контролируемых лабораторных условиях с использованием высокоточного аналитического оборудования и сопровождаются статистической обработкой данных для обеспечения достоверности и воспроизводимости результатов.

Результаты обзора

В результате многочисленных исследований показано, что самораспадающиеся шлаки НФХ могут выступать в качестве эффективной активной минеральной добавки при производстве портландцемента. Пуццоланическая активность шлака и его способность связывать свободную известь, образующуюся при гидратации клинкера [8-10], позволяет получать цементы с сопоставимыми или даже улучшенными прочностными характеристиками на поздних сроках твердения при замещении измельченным шлаком НФХ до 20-30% цементного клинкера. Такие композиции демонстрируют повышенную сульфатостойкость и более низкую теплоту гидратации, что актуально для массивных бетонных конструкций [42]. Более того, разработаны и внедряются технологии получения бесклинкерных вяжущих на основе самораспадающихся шлаков, активированных щелочными растворами (NaOH, KOH, силикат натрия), известью или гипсом [11, 12]. Полученные вяжущие обладают высокой прочностью на сжатие (до 40-60 МПа), отличной водостойкостью и морозостойкостью, что позволяет использовать их для производства строительных блоков, тротуарной плитки и неответственных бетонных конструкций [43].

Применение измельченного самораспадающегося шлака в составе бетонов и растворов в качестве частичного заменителя цемента (до 15-25%) или тонкого заполнителя приводит к повышению плотности, снижению водопоглощения и улучшению микроструктуры бетона за счет эффекта микронаполнителя [44, 45]. Также отмечено снижение усадки и улучшение долговечности некоторых типов бетонов [46].

Возможность получения легких пористых заполнителей, например аналогов керамзита или шлаковой пемзы, с насыпной плотностью 500-800 кг/м³ и прочностью, достаточной для легких бетонов и теплоизоляционных материалов, рассмотрена в работе [13]. Этот способ представляет собой высокотемпературное спекание смесей самораспадающегося шлака с глинистыми добавками или другими отходами.

Шлаки НФХ также могут использоваться в качестве флюсующей добавки при производстве керамических изделий, способствуя снижению температуры обжига и улучшению физико-механических свойств готовой продукции [14].

Высокое содержание окси кальция (более 40%) позволяет использовать самораспадающиеся шлаки НФХ в качестве эффективного известкового мелиоранта для кислых почв [15, 16]. Их применение способствует значительному повышению рН почвы, улучшению ее агрегатной структуры, повышению влагоудерживающей способности и доступности макро- и микроэлементов (Ca, Mg, Si) для растений [47]. Исследования [15-17] показали увеличение урожайности различных сельскохозяйственных культур (зерновые, овощные) при внесении шлака в рекомендованных дозировках.

Следует отметить, что при соблюдении дозировок уровень содержания хрома в почве и растениях остается в пределах, соответствующих гигиеническим нормативам, что критически важно для безопасности пищевой цепи [17, 48].

Высокая сорбционная активность самораспадающихся шлаков НФХ обусловлена развитой удельной поверхностью (до 5-10 м²/г) после самораспада и наличию активных оксидов (CaO, Fe₂O₃, Al₂O₃). Эти шлаки эффективны в удалении ионов тяжелых металлов Cr(VI), Pb²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺ [18, 49], а также фосфатов и фторидов [19, 50] из промышленных и бытовых сточных вод. Механизмы удаления включают адсорбцию, ионный обмен и химическое осаждение. Сорбционная емкость может быть дополнительно повышена путем кислотной или щелочной активации, а также создания композитных материалов на основе шлака [20, 51].

Отдельно следует отметить исследования по удалению шестивалентного хрома: шлаки НФХ, содержащие Fe²⁺ и другие восстановители, способны восстанавливать Cr(VI) до менее токсичного Cr(III), который затем может быть осажден или сорбирован [52].

Самораспадающиеся шлаки НФХ, особенно их более крупные фракции, благодаря хорошим показателям прочности, морозостойкости и дренажных свойств могут быть успешно применены в составе материалов для несвязанных и гидравлически связанных слоев

оснований автомобильных дорог, а также для отсыпки промышленных площадок и железнодорожных насыпей [21, 53]. Использование шлаков в дорожном строительстве позволяет значительно сократить потребление природного камня, снижая логистические затраты и экологическую нагрузку [22]. Важным аспектом является проведение тестов на выщелачивание для оценки экологической безопасности при длительной эксплуатации [39, 40].

Таким образом, исследования последнего десятилетия подтверждают многофункциональность и экономическую целесообразность применения самораспадающихся шлаков НФХ, как ценного вторичного сырья, применимого в различных отраслях промышленности. Тем самым, эти шлаки переходят от проблемного отхода к ценному ресурсу, обладающему множеством высокоеффективных применений.

Обсуждение

Главным и неоспоримым преимуществом является отсутствие необходимости в дорогостоящем механическом измельчении [3]. Природная дезинтеграция шлака до мелкодисперсного состояния существенно снижает капитальные и эксплуатационные затраты на его подготовку. Использование шлака в качестве заменителя первичного сырья (например, цементного клинкера, извести, природных заполнителей) приводит к значительной экономии ресурсов и снижению себестоимости конечной продукции [9].

Технологиями, использующими природную способность шлаков НФХ к самораспаду и позволяющими применять материал без этапа механического измельчения, являются, например, производство алкали-активированных вяжущих, лёгких пористых заполнителей и сорбентов для мелиорации и водоочистки. Исключение энергоёмкого помола потенциально может снизить себестоимость конечной продукции в среднем на 15-40 % и делает переработку шлаков экономически и экологически более эффективной [3, 9, 10].

Вторичное использование шлаков ведет к сокращению объемов отходов, направляемых на полигоны, и, как следствие, уменьшается площадь шлакоотвалов и степень запыленности прилегающих территорий [54]. Использование шлаков в цементной промышленности для замены клинкера способствует снижению выбросов диоксида углерода, который образуется в этом процессе при декарбонизации известняка [55]. Кроме того, шлаки, имея сорбционные свойства, могут выступать в роли барьера в процессе транспорта токсикантов в почве или воде. Результаты исследований показывают многофункциональность самораспадающихся шлаков НФХ. Их можно успешно применять в различных сферах: от производства высококачественных строительных материалов до мелиорации почв и очистки воды. Эта гибкость в выборе направлений утилизации позволяет предприятиям адаптироваться к рыночному спросу и обеспечивать максимальную ценность отходов [9, 10, 15, 18]. Такая многофункциональность самораспадающихся шлаков НФХ является основным экологическим преимуществом их использования по сравнению с традиционными методами утилизации промышленных отходов.

Химический и фазовый состав шлака, в частности, содержание силиката кальция, оксида кальция и аморфных фаз, придает ему пуццоланические, гидравлические и сорбционные свойства [7, 9]. Эти свойства могут быть усилены при соответствующей активации (механической, химической), после которой шлак становится не просто наполнителем, а активным компонентом новых материалов. Например, в работах [4, 11] шлаковый порошок НФХ использовался для замещения цемента в пропорциях 0 %, 10 %, 20 %, 30 % и 40 % по массе, соответственно.

Несмотря на вышеуказанные преимущества применение этих шлаков имеет ряд проблем и ограничений. Химический состав шлаков НФХ может значительно варьироваться в зависимости от используемого сырья (руды), типа печи и технологического режима производства феррохрома [6]. Это требует постоянного контроля качества шлака и адаптации рецептур при его использовании, чтобы обеспечить стабильность свойств конечной продукции. Самым критичным аспектом является потенциальное присутствие хрома, особенно в шестивалентной форме Cr(VI) – канцерогенной и высокотоксичной [56]. Хотя хром в шлаках НФХ находится преимущественно в стабильной и малорастворимой трехвалентной форме Cr(III) в составе шпинелей, существует риск его окисления до Cr(VI) в определенных условиях (например, при высокотемпературной обработке в окислительной среде или при контакте с агрессивными растворами) [17, 39]. Жесткий контроль выщелачивания (EN 12457,

TCLP) и разработка методов стабилизации Cr(VI) или его восстановления до Cr(III) являются обязательными для безопасного применения шлаков НФХ [40, 52].

Для широкого внедрения технологий на основе шлаков НФХ необходима разработка и утверждение национальных и международных стандартов и нормативных документов, регламентирующих их применение в различных отраслях. Отсутствие таких стандартов может затруднять коммерциализацию и масштабирование технологий [9]. Несмотря на положительные лабораторные и пилотные результаты, необходимы более длительные и широкомасштабные исследования эксплуатационных характеристик (долговечность, устойчивость и другие) материалов на основе шлаков НФХ в реальных условиях эксплуатации, особенно в агрессивных средах [57]. Масштабное производство материалов из шлаков требует эффективной логистической инфраструктуры для транспортировки больших объемов шлаков от мест образования к перерабатывающим предприятиям, а также продуманной стратегии для производства достаточных объемов конечной продукции, удовлетворяющим рыночный спрос [3].

Эти проблемы требуют от научного сообщества и промышленности активно работать над их преодолением. Развитие аналитических методов, появление новых методов активации и модификации материалов, а также усиление междисциплинарного сотрудничества способствуют дальнейшему расширению возможностей применения самораспадающихся шлаков НФХ, переводя их из категории отходов в статус ценного компонента для многих видов производств.

Заключение

На основании всестороннего обзора современных мировых технологий можно сделать следующие ключевые выводы о высокоэффективных способах применения этих шлаков:

- разработка бесклинкерных вяжущих и геополимеров на основе шлаков НФХ открывает новые перспективы для развития циркулярной экономики и создания экологичных и высокопрочных строительных материалов;
- благодаря высокому содержанию оксида кальция, шлаки НФХ могут эффективно применяться для раскисления кислых почв и улучшения их структуры, при этом обеспечивая поступление макро- и микроэлементов при контроле содержания хрома;
- использование модифицированных сорбентов на основе шлаков НФХ повышает эффективность удаления тяжелых металлов, фосфатов и фторидов из сточных вод;
- применение шлаков НФХ в дорожном строительстве позволяет экономить природный камень и обеспечивать требуемые физико-механические и дренажные свойства покрытий;
- основные экологические преимущества использования самораспадающихся шлаков по сравнению с традиционными методами утилизации промышленных отходов заключается в экологическом преимуществе за счёт снижения объемов отходов, снижения выбросов диоксида углерода и экономии потребления природных ресурсов благодаря их повторному вовлечению в производство.

Таким образом, природная способность шлаков НФХ к самопроизвольному распаду в мелкодисперсный порошок позволяет значительно снизить энергозатраты на подготовку сырья, делая процессы переработки экономически выгодными. Кроме этого, потенциал шлаков НФХ выходит за рамки традиционного строительства: они могут стать базой для инновационных материалов и технологий, объединяющих экологическую безопасность, экономическую эффективность и устойчивое развитие отрасли. Дальнейшие исследования направлены на повышение стабильности материалов и минимизацию рисков, связанных с выщелачиванием хрома.

Список литературы

1. Characteristics of ferrochrome slag aggregate and its uses as a green material in concrete – a review / A.I. Fares et al // Construction and Building Materials. – 2021. – Т. 294. – Н. 123552. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123552>.
2. Research progress on controlled low-strength materials: metallurgical waste slag as cementitious materials / Y. Liu et al // Materials. – 2022. – Т. 15(3). – Р. 727. <https://doi.org/10.3390/ma15030727>.
3. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete – A review / Y. Jiang et al // Resources, Conservation and Recycling. – 2018. – Т. 136. – Р. 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.023>.

4. Nagarajan M. Some investigation on ternary powder (binder) technology incorporated with ferrochrome slag as fine aggregate in concrete / M. Nagarajan, P. Vijayan // Journal of Material Cycles and Waste Management. – 2023. – Т. 25(5). – Р. 2822-2834. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01710-y>.
5. Acharya P.K. Utilization of ferrochrome wastes such as ferrochrome ash and ferrochrome slag in concrete manufacturing / P.K. Acharya, S.K. Patro // Waste Management & Research. – 2016. – Т. 34(8). – Р. 764-774. <https://doi.org/10.1177/0734242X16654751>.
6. Green transformation of ferrochrome slag by geopolymers: Physical properties, fly ash replacement and chromium immobilization / S. Yu et al // Construction and Building Materials. – 2025. – Т. 462. – Р. 140063. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140063>.
7. Kinetics and mechanism of Pb (II), Cd (II) and Cu (II) adsorption on ferrochrome ash from aqueous solutions / E. Ugurlu et al // International Journal of Environmental Analytical Chemistry. – 2025. – Т. 105(10). – Р. 2369-2394. <https://doi.org/10.1080/03067319.2024.2315480>.
8. Al-Jabri K.S. Research on the use of Ferro-Chrome slag in civil engineering applications / K.S. Al-Jabri // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences. – 2018. – Т. 149. – Р. 01017. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901017>.
9. Integrated management of ferrochrome slag: Metal recovery, Cr (VI) stabilization, and sustainable reuse in construction materials / A.K. Tripathi et al // Journal of Environmental Management. – 2025. – Т. 390. – Р. 126268. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126268>.
10. Nath S.K. Geopolymerization behavior of ferrochrome slag and fly ash blends / S.K. Nath // Construction and Building Materials. – 2018. – Т. 181. – Р. 487-494. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.070>.
11. Design and Study of Physical and Mechanical Properties of Concrete Based on Ferrochrome Slag and Its Mechanism Analysis / M. Hang et al // Buildings. – 2023. – Т. 13(1). – Р. 54. <https://doi.org/10.3390/buildings13010054>.
12. Ferrochrome slag: a critical review of its properties, environmental issues and sustainable utilization / S.K. Das et al // Journal of Environmental Management. – 2023. – Т. 326. – Р. 116674. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116674>.
13. Valorization and enhancement mechanism of ferrochrome slag as aggregate for manufacturing ultra-high performance concrete (UHPC) / Y. Zhu et al // Cement and Concrete Composites. – 2023. – Т. 144. – Р. 105298. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105298>.
14. Influence mechanisms of porous aggregate morphology, maximum size and optimized gradation on ultra-high performance concrete with ferrochrome slag / Y. Zhu et al // Cement and Concrete Composites. – 2025. – Т. 157. – Р. 105890. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105890>.
15. Adsorptive removal of five heavy metals from water using blast furnace slag and fly ash / T.C. Nguyen et al // Environmental science and pollution research. – 2018. – Т. 25(21). – Р. 20430-20438. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9610-4>.
16. Chowdhury S.R. Recycled Smelter Slags for In Situ and Ex Situ Water and Wastewater Treatment – Current Knowledge and Opportunities / S.R. Chowdhury // Processes. – 2023. – Т. 11(3). – Р. 783. <https://doi.org/10.3390/pr11030783>.
17. Mechanism of Acid Mine Drainage Remediation with Steel Slag / M. Yang et al // ACS Omega. – 2021. – Т. 6(43). – Р. 28675-28684. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03504>.
18. Pokhrel G.R. The effect of chromium on human-health: A review / G.R. Pokhrel, G. Pokhrel // BMC Journal of Scientific Research. – 2022. – Т. 5(1). – Р. 27-35. <https://doi.org/10.3126/bmcjsr.v5i1.50669>.
19. Ironmaking and steelmaking slags as sustainable adsorbents for industrial effluents and wastewater treatment: a critical review of properties, performance, challenges and opportunities / J. Manchisi et al // Sustainability. – 2020. – Т. 12(5). – Р. 2118. <https://doi.org/10.3390/su12052118>.
20. Jiao M. A critical review of the material characteristics, utilizations, limitations, and advanced applications of ferrochrome slag / M. Jiao, Z. Rong, L. Zhang // Construction and Building Materials. – 2024. – Т. 426. – Р. 136180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136180>.
21. Comprehensive characterization of ferrochrome slag and ferrochrome ash as sustainable materials in construction / B.A.V.R. Kumar et al // Journal of Nanomaterials. – 2022. – Т. 2022(1). – Р. 8571055. <https://doi.org/10.1155/2022/8571055>.
22. Hydration Activity and Carbonation Characteristics of Dicalcium Silicate in Steel Slag / S. Liu et al // Metals. – 2021. – Т. 11(10). – Р. 1580. <https://doi.org/10.3390/met11101580>.

23. Valuable recovery technology and resource utilization of chromium-containing metallurgical dust and slag: a review / J. Xu et al // *Metals*. – 2023. – T. 13(10). – P. 1768. <https://doi.org/10.3390/met13101768>.
24. Dinnebier R.E. Rietveld Refinement: Practical Powder Diffraction Pattern Analysis Using TOPAS / R.E. Dinnebier, A. Leineweber, J.S.O. Evans // Berlin: De Gruyter. – 2018. <https://doi.org/10.1515/9783110461381>.
25. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis / J. Goldstein et al // 4th ed. New York: Springer, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6676-9>.
26. Geopolymer and Geopolymer matrix composites / D. Jia et al. – Singapore : Springer, 2020. – P. 81-129. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-9536-3>.
27. De Belie N. Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials / N. De Belie, M. Soutsos, E. Gruyaert (Eds.) // Cham: Springer, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1>.
28. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) / M. Thommes et al // *Pure and applied chemistry*. – 2015. – T. 87(9-10). – P. 1051-1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>.
29. Vyazovkin S. Isoconversional kinetics of thermally stimulated processes / S. Vyazovkin. – Springer, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14175-6_1.
30. Recent trends in mechanochemical processing of fly ash aluminosilicate materials (geopolymers): advancement, challenges, and opportunities / P. Bhardwaj et al // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. – 2024. – T. 26(1). – P. 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01817-2>.
31. Bin Tasnim T. Chromium stabilization in ferrochromium slag for its utilization as aggregate material / T. Bin Tasnim, L. Tafaghodi Khajavi // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2022. – T. 8(3). – P. 1041-1052. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00542-8>.
32. Provis J. L. Alkali-activated materials // *Cement and concrete research*. – 2018. – T. 114. – C. 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>.
33. ACI Committee et al. ACI 318-19: Building code requirements for structural concrete and commentary //American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2020. ISBN 9781641950862.
34. Advanced concrete technology / Z. Li et al. – John Wiley & Sons, 2022. ISBN 9781119806257.
35. Blum W.E.H. Essentials of Soil Science: soil formation, functions, use and classification (World Reference Base, WRB) / W.E.H. Blum, P. Schad, S. Nortcliff. – Gebr. Borntraeger Science Publishers, 2017. ISBN 9783443011291.
36. Adsorption isotherms in liquid phase: experimental, modeling, and interpretations / J.S. Piccin et al // *Adsorption processes for water treatment and purification*. – Cham : Springer International Publishing. – 2017. – P. 19-51. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58136-1_2.
37. A revised pseudo-second-order kinetic model for adsorption, sensitive to changes in adsorbate and adsorbent concentrations / J.C. Bullen et al // *Langmuir*. – 2021. – T. 37(10). – P. 3189-3201. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c00142>.
38. Mishra B. A study on use of industrial wastes in rural road construction / B. Mishra, R.S. Mishra // *International journal of innovative research in science, engineering and technology*. – 2015. – T. 4(11). – P. 10387-10398. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2015.0411009>.
39. Stiernström S. Evaluation of frameworks for ecotoxicological hazard classification of waste / S. Stiernström, O. Wik, D. Bendz // *Waste Management*. – 2016. – T. 58. – P. 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.030>.
40. Leaching methods for the environmental assessment of industrial waste before its use in construction / M. Regadío et al // *Advances in Sustainable Materials and Resilient Infrastructure*. – Singapore: Springer Singapore, 2022. – P. 339-356. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9744-9_23.
41. Domenech H. Radiation safety / H. Domenech // *Management and Programs*. Suiza: Springer. – 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42671-6>.
42. The potential usage of waste ferrochrome slag in alkali-activated mixes / N. Miyan et al // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – T. 75. – P. 107026. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107026>.
43. Characterization of ferrochrome ash and blast furnace slag based alkali-activated paste and mortar / T. Omur et al // *Construction and Building Materials*. – 2023. – T. 363. – P. 129805. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129805>.

44. Towards sustainable construction: utilization of ferrochrome slag as Portland cement replacement in cementitious composites / S.K. Das et al // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2023. – Т. 9(1). – Р. 329-340. <https://doi.org/10.1007/s40831-023-00653-w>.
45. Al Hindasi Y. Sustainable application of ferrochrome slag as green aggregate material for novel application in concrete-A review / Y. Al Hindasi, N.H.A.S. Lim, N. Rajamohan // Journal of Hazardous Materials Advances. – 2025. – Р. 100681. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100681>.
46. Al-Jabri K. Influence of nano metakaolin on thermo-physical, mechanical and microstructural properties of high-volume ferrochrome slag mortar / K. Al-Jabri, H. Shoukry // Construction and Building Materials. – 2018. – Т. 177. – Р. 210-221. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.125>.
47. Coetze J.J. Chromium in environment, its toxic effect from chromite-mining and ferrochrome industries, and its possible bioremediation / J.J. Coetze, N. Bansal, E.M.N. Chirwa // Exposure and health. – 2020. – Т. 12(1). – Р. 51-62. <https://doi.org/10.1007/s12403-018-0284-z>.
48. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality: incorporating the first and second addenda. – World Health Organization, 2022. ISBN-13 9789240045064.
49. Removal of chromium species by adsorption: fundamental principles, newly developed adsorbents and future perspectives / B. Liu et al // Molecules. – 2023. – Т. 28(2). – Р. 639. <https://doi.org/10.3390/molecules28020639>.
50. Efficient fluoride removal using Al-Cu oxide nanoparticles supported on steel slag industrial waste solid / A. Blanco-Flores et al // Environmental Science and Pollution Research. – 2018. – Т. 25(7). – Р. 6414-6428. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0849-6>.
51. Efficient adsorption of hexavalent chromium ions onto novel ferrochrome slag/polyaniline nanocomposite: ANN modeling, isotherms, kinetics, and thermodynamic studies / M.I. Khan et al // Environmental Science and Pollution Research. – 2022. – Т. 29(57). – Р. 86665-86679. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21778-7>.
52. Study of chromium immobilization behavior in unbound and concrete bound ferrochromium slag / C. Panda et al // Journal of Material Cycles and Waste Management. – 2022. – Т. 24(2). – Р. 528-539. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01337-x>.
53. Assessment of valorisation opportunities for secondary metallurgy slag through multi-criteria decision making / M. Falsafi et al // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Т. 402. – Р. 136838. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136838>.
54. Salihpasaoglu F. Use of waste ferrochromium slag as aggregate in concrete / F. Salihpasaoglu, O. Sengul // Journal of Material Cycles and Waste Management. – 2020. – Т. 22(6). – Р. 2048-2058. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01091-6>.
55. Properties of concrete with ferrochrome slag as a fine aggregate at elevated temperatures / M.Z. Islam et al // Case Studies in Construction Materials. – 2021. – Т. 15. – Р. e00599. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00599>.
56. Costa M. Overview of chromium (III) toxicology / M. Costa, A. Murphy // The nutritional biochemistry of chromium (III). – Elsevier, 2019. – Р. 341-359. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64121-2.00011-8>.
57. Dey S. An experimental study on strength and durability properties of concrete with partial replacement of aggregate with ferrochrome slag / S. Dey, A. Anurag, Praveen V.V. Kumar // Architecture, Structures and Construction. – 2022. – Т. 2(3). – Р. 335-347. <https://doi.org/10.1007/s44150-022-00072-7>.

А.Қ. Қайрақбаев¹, М.Б. Алиев², Ж.Б. Тукашев³

¹Бәйішев университеті,

030000, Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қаласы, Ағайынды Жұбановтар көшесі, 302а

²«Quanta Science» ЖҚК,

030000, Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қаласы, М.Шоқай көшесі, 338

³К. Жұбанов атындағы Ақтөбе өнірлік университеті,

030000, Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қаласы, Ағайынды Жұбановтар көшесі, 302а

*e-mail: kairak@mail.ru

ӨЗДІГІНЕҢ ҮДҮРАЙТЫН ТӨМЕН КӨМІРТЕКТІ ФЕРРОХРОМ ӨНДІРІСІНІҢ ҚОЖДАРЫН ТИМДІ ҚОЛДАНУДЫҢ ЗАМАНАУИ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ

Төмен көміртекті феррохром өндірісі қождардың едәуір көлемінің пайда болуымен қатар жүреді, олардың басты ерекшелігі-салқындау нәтижесінде және атмосфералық факторлардың әсерінен өздігінен ыдырау қабілеті. Бұл құбылыс β -дикальций силикатының (C_2S) γ -модификацияға полиморфты түрленуіне байланысты көлемнің үлғауымен бірге жүреді. Бұл бірегей сипаттама, бір жағынан, қалдықтарды тиімді орналастырудың қындықтар тұғызды, екінші жағынан, қымбат ұсақтаудың қажет етпестен оларды тиімді және үнемді кәдеге жарату үшін кең мүмкіндіктер ашады. Бұл мақалада өздігінен ыдырайтын төмен көміртекті феррохром өндірісі қождарын қолдану проблемасы бойынша заманауи әлемдік деңгейдегі жоғары тиімді технологияларға жүйелі талдау жасалды. Оларды құрылыш материалдарын (цементтер, бетондар, тұмтқыр заттар), суды тазартуға арналған сорбенттерді, ауыл шаруашылығына арналған мелиоранттарды өндіруде, сондай-ақ жол құрылышында пайдалануға бағытталған технологияларға ерекше назар аударылады. Бұл жұмыста соңғы он жылда жарияланған және өздігінен ыдырайтын төмен көміртекті феррохром өндірісі қождарын қолданудың ең тиімді технологияларының сипаттамасын қамтитын елу жеті дереккөзге әдеби шолу жасалды.

Мақаланың мақсаты экологиялық ауыртпалықты төмендетуге, ферроқорытпа өндірісінің ресурстық тиімділігін арттыруға және тұйық экономика қағидаттарын дамытуға ықпал ететін құнды қайтала машиналардың әлеуетін көрсету болып табылады.

Түйін сөздер: төмен көміртекті феррохром өндірісінің қождары, өздігінен ыдырайтын қождар, өнеркәсіптік қалдықтардың кәдеге жарату, технологендік қалдықтар, металлургия қалдықтары, Ферроқорытпа өндірісінің қождарын тиімді қолдану.

А.К. Kairakbaev¹, М. В. Aliyev³, Z.B. Tukashev²

¹Baishev University,

030000, Republic of Kazakhstan, Aktobe, Brothers Zhubanov street, 302a

²«Quanta Science» Individual entrepreneur,

030000, Republic of Kazakhstan, Aktobe, M.Shokay street, 338

³K. Zhubanov Aktobe Regional University,

030000, Republic of Kazakhstan, Aktobe, 34 Aliya Moldagulova Avenue

*e-mail: kairak@mail.ru

CONTEMPORARY TECHNOLOGIES FOR THE EFFECTIVE USE OF SELF-DISINTEGRATING SLAGS OF LOW-CARBON FERROCHROME PRODUCTION

The production of low-carbon ferrochrome is inevitably accompanied by the formation of significant volumes of slags, the key feature of which is their ability to spontaneously disintegrate upon cooling and exposure to atmospheric factors. This phenomenon is caused by polymorphic transformations of β -dicalcium silicate (C_2S) into the γ -modification, accompanied by an increase in volume. This unique characteristic, on the one hand, creates challenges in waste management, on the other hand, it opens up wide opportunities for their efficient and cost-effective disposal without the need for expensive crushing. This review article is a systematic analysis and generalization of modern high-performance world-class technologies for the use of self-decaying slags produced by low-carbon ferrochrome. Special attention is paid to their use in the production of building materials (cements, concretes, binders), sorbents for water treatment, ameliorants for agriculture, as well as in road construction. This paper provides a literary review of fifty-seven sources published over the past ten years describing the most effective technologies for the use of self-decaying slags for the production of low-carbon ferrochrome.

The purpose of the article is to demonstrate the potential of these slags as valuable secondary raw materials that contribute to reducing the environmental burden, increasing the resource efficiency of ferroalloy production and developing the principles of circular economy.

Key words: slags produced by low-carbon ferrochrome, self-decomposing slags, industrial waste disposal, man-made waste, metallurgical waste, effective use of ferroalloy slags.

Авторлар туралы мәліметтер

Аят Қырымұлы Қайрақбаев* – «Баишев университет» мекемесі, PhD докторы, профессор, Ақтөбе, Қазақстан; e-mail: kairak@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4416-4782>.

Мурат Бакытжанович Алиев – «Quanta Science» ЖК, химия ғылымдарының кандидаты, доцент, Ақтөбе, Қазақстан; e-mail: 301744@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7148-2623>.

Жұмабай Баракбаевич Тукашев – К. Жұбанов атындағы Ақтөбе өнірлік университеті, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Ақтөбе, Қазақстан; e-mail: mr.tukashev@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5617-6748>.

Сведения об авторах

Аят Крымович Кайракбаев* – Учреждение «Баишев университет», доктор PhD, профессор, Актобе, Казахстан; e-mail: kairak@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4416-4782>.

Мурат Бакытжанович Алиев – «Quanta Science» ИП, кандидат химических наук, доцент, Актобе, Казахстан; e-mail: 301744@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7148-2623>.

Жумабай Баракбаевич Тукашев – Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова, кандидат технических наук, доцент, Актобе, Казахстан; e-mail: mr.tukashev@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5617-6748>.

Information about the authors

Aiat Krymovich Kairakbaev* – Baishev University, PhD, professor, Aktobe, Kazakhstan; e-mail: kairak@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4416-4782>.

Murat Bakytzhanovich Aliyev – «Quanta Science» Individual entrepreneur, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Aktobe, Kazakhstan; e-mail: 301744@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7148-2623>.

Zhumabai Barakbayevich Tukashev – Aktobe Regional University named after K.Zhubanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Aktobe, Kazakhstan; e-mail: mr.tukashev@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5617-6748>.

Поступила в редакцию 18.09.2025

Поступила после доработки 26.10.2025

Принята к публикации 28.10.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4\(20\)-70](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4(20)-70)

МРНТИ: 31.19.15



А. Кливенко^{1*}, А. Касымов¹, Е. Евлампиева¹, Д. Шабдарбаева², А. Дюсупов²

¹Шекерим университет,
071412 Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20А

²Медицинский университет Семей
071400 Республика Казахстан, г. Семей, ул. Абая, 103
*e-mail: alexeyklivenko@mail.ru

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ В СЕЛАХ ИЗ ЗОНЫ ЧРЕЗВЫЧАЙНОГО И МАКСИМАЛЬНОГО РАДИАЦИОННОГО РИСКОВ ОБЛАСТИ АБАЙ

Аннотация: Проведено исследование качества питьевой воды в селах, расположенных в зонах чрезвычайного (Долонь, Мостик, Черемушка, Саржал) и максимального (Караул, Кайнар) радиационного рисков на территории области Абай, прилегающей к бывшему Семипалатинскому испытательному полигону. Целью работы была оценка воды по показателям общей минерализации (TDS) и содержанию основных катионов (натрий, калий, кальций, магний). Анализ проб, отобранных из систем центрального водоснабжения, показал, что в трех населенных пунктах (Саржал, Кайнар, Долонь) общая минерализация превышает рекомендуемый ВОЗ предел в 1000 мг/л, достигая в селе Долонь 1500 мг/л. Во всех исследуемых селах, кроме Черемушки, зафиксировано повышенное содержание натрия, при этом в селах Кайнар и Долонь его концентрация превышает установленную ПДК в 200 мг/л. Общая жесткость воды в большинстве проб соответствует нормативам, за исключением образца воды из села Долонь, где вода классифицируется как жесткая. Вода в селе Черемушка, не имеющем центрального водоснабжения, характеризуется физиологически недостаточным содержанием кальция. Результаты свидетельствуют о неудовлетворительном качестве питьевой воды в большинстве изученных населенных пунктов зоны радиационного риска.

Ключевые слова: питьевая вода, зона чрезвычайного радиационного риска, жесткость воды, кальций, магний, натрий, калий.

Введение

Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН 64/292 (2010 г.) «Право человека на воду и санитарию» [1] провозглашает право на безопасную и чистую питьевую воду и санитарию как право человека, имеющее существенное значение для полноценной жизни и полного осуществления всех прав. Кроме того, вода, является ключевым залогом национальной безопасности государства. В Казахстане реализуется централизованное государственное