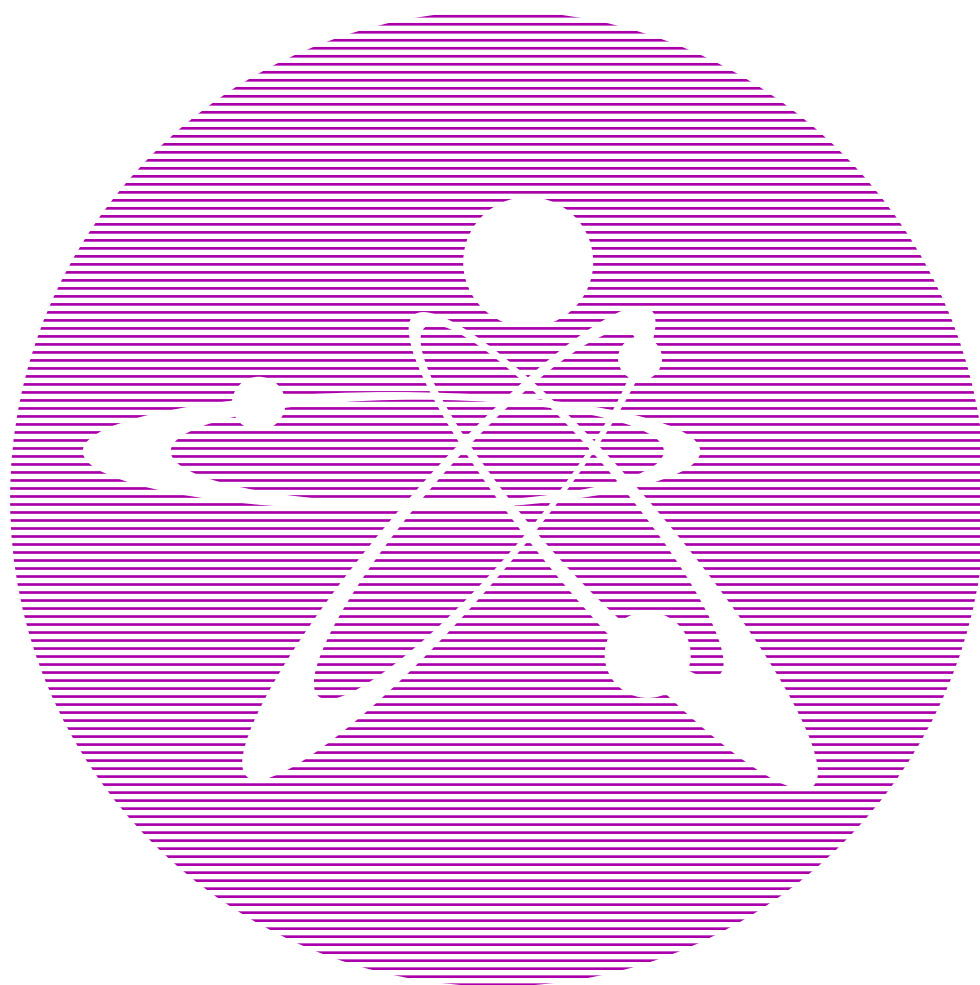


2024
ВЫПУСК 1

ISSN 1729-7516

ЖАҢА
Вестник

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 1(97), МАРТ 2024

Издается с января 2000 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – д.ф.-м.н., профессор БАТЫРБЕКОВ Э.Г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: д.ф.-м.н. СКАКОВ М.К. – заместитель главного редактора,
к.б.н. АЙДАРХАНОВ А.О., д.ф.-м.н. БУРТЕБАЕВ Н.Т., д.т.н. ВЕЛЕБА В. (Польша), к.ф.-м.н. ВИТЮК В.А.,
к.ф.-м.н. ВУРИМ А.Д., д.т.н. ГРАДОБОЕВ А.В. (Россия), д.ф.-м.н. КОПНИЧЕВ Ю.Ф. (Россия),
д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., д.ф.-м.н. СОКОЛОВА И.Н., д.ф.-м.н. ТАЖИБАЕВА И.Л.,
Prof. Dr. Yoichi FUJII-E (Япония), PhD Takahiro HAYASHI (Япония)

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ
МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

1(97) ШЫҒАРЫМ, НАУРЫЗ, 2024 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

RESEARCH AND TECHNOLOGY REVIEW
NATIONAL NUCLEAR CENTER OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSUE 1(97), March 2024

Журнал «Вестник НЯЦ РК» входит в перечень научных изданий, рекомендуемых Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан для публикации основных результатов научной деятельности.

«ҚР ҰЯО жаршысы» журналы ғылыми қызметтің негізгі нәтижелерін жариялау үшін Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған ғылыми басылымдар тізбесіне кіреді.

The Journal “NNC RK Bulletin” is included in the list of scientific publications recommended by Committee for Quality Assurance in the Field of Science and Higher Education of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan for the publication of the main results of scientific activities.

СОДЕРЖАНИЕ

ИЗУЧЕНИЕ ПОДХОДОВ ЕВРОПЕЙСКИХ СТРАН В ФОРСАЙТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ РАЗВИТИЯ НАУКИ И «ЗЕЛЕННЫХ» ТЕХНОЛОГИЙ С ЦЕЛЬЮ АДАПТАЦИИ ИХ ОПЫТА В КОНТЕКСТЕ КАЗАХСТАНА	
Д. И. Бакранова, А. С. Серикканов, А. С. Джумадильдаев, К. Е. Оразалиев	4
КРАТКИЙ ОБЗОР СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ TiSiCN И МЕТОДА РЕАКТИВНО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ	
Л. С. Баймолданова, Б. К. Рахадиллов, А. Кенесбеков, А. Кусайнов, А. Маулит.....	13
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ И УПРУГИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛА $Y_3Al_5O_{12}$	
Г. М. Баубекова, А. Ахмедов, Ф. У. Абуова, Р. Н. Асылбаев, А. У. Абуова, Г. П. Турсумбаева, Г. Д. Кабдрахимова.....	24
ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРЕСНОЙ ВОДЫ МИКРОПЛАСТИКОМ: ИСТОЧНИКИ, ПОСЛЕДСТВИЯ И СТРАТЕГИИ СМЯГЧЕНИЯ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)	
К. Бексейтова, А. Байменов, У. Жантикеев, Е. Сайлауханулы, А. В. Есин, С. Михаловский, С. Азат	34
СИНТЕЗ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ КЕРАМИК С ВАРИАЦИЕЙ СТЕХИОМЕТРИИ КОМПОНЕНТ КЕРАМИК	
А. Л. Козловский, Д. Б. Боргеков, Р. И. Шакирзянов, А. С. Загребова, А. А. Хаметова, А. Т. Жумажанова.....	45
IAEA МЕДИЦИНАЛЫҚ ИЗОТОПТАРЫНЫҢ БРАУЗЕРІН ЙОД-123 ӨНДІРІСІН МОДЕЛЬДЕУ ҮШІН ПАЙДАЛАНУ	
С. Н. Мукашева, Д. А. Мынжасарова	55
РЕКОГНОСЦИРОВОЧНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНСЕРВИРОВАННЫХ УРАНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ И НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ	
С. Б. Субботин, П. Е. Кривицкий, Н. В. Ларионова, А. К. Айдарханова, А. С. Мамырбаева, Ж. Е. Тлеуканова, И. А. Александрович, М. В. Скрипников, И. А. Бачурина, Р. Г. Ермакова	63
ОЦЕНКА ИСТОЧНИКОВ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ	
Т. Ш. Токтаганов, А. О. Айдарханов, А. К. Айдарханова, Е. В. Сотников, А. С. Мамырбаева, Ж. Е. Тлеуканова.....	73
ИЗУЧЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И СОДЕРЖАНИЯ В НЕМ РАДИОНУКЛИДОВ НА ПЛОЩАДКЕ «АКТАН-БЕРЛИ»	
Н. В. Ларионова, А. В. Топорова, В. В. Полевик, Е. Н. Поливкина, П. Е. Кривицкий, Л. В. Тимонова, Л. Ф. Субботина, М. Т. Абишева, В. Н. Монаенко, А. О. Айдарханов	80
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ШТАТНЫХ И АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ	
М. К. Мукушева, С. И. Спиридонов, Р. А. Микаилова, А. В. Топорова	89
ОБЗОР ГИС-ПЛАТФОРМ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ИХ ПРИМЕНИМОСТИ В КОНТЕКСТЕ УСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗЕМЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ И ВОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ БЫВШЕГО СИП	
И. А. Бачурина, В. Н. Монаенко, Н. В. Ларионова, А. В. Топорова	96
UPTAKE OF TIGHTLY BOUND TRITIUM BY PLANTS	
E. N. Polivkina, N. V. Larionova, L.V. Timonova, Ye. S. Syssoeva, A.V. Panitskiy	104
СПИСОК АВТОРОВ.....	108

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-4-12>

УДК 620.9. 502.33 332.012.2

ИЗУЧЕНИЕ ПОДХОДОВ ЕВРОПЕЙСКИХ СТРАН В ФОРСАЙТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ РАЗВИТИЯ НАУКИ И «ЗЕЛЕННЫХ» ТЕХНОЛОГИЙ С ЦЕЛЬЮ АДАПТАЦИИ ИХ ОПЫТА В КОНТЕКСТЕ КАЗАХСТАНА

Д. И. Бакранова^{1*}, А. С. Серикканов², А. С. Джумадильдаев², К. Е. Оразалиев²

¹ *Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан*

² *Национальная академия наук Республики Казахстан при Президенте Республики Казахстан, Алматы, Казахстан*

*E-mail для контактов: dinabakranova@gmail.com

В данной статье проведен обзор применения методов форсайта в сфере науки, особенно в разработке «зеленых» технологий в различных европейских странах с целью выявления наиболее подходящих подходов для их использования в Казахстане в будущем. Анализ показывает, что прогнозирование «зеленых» технологий обещает быть эффективным инструментом управления устойчивым развитием. Методы прогнозирования «зеленых» технологий ориентированы на системный подход и комплексные решения, учитывая окружающую среду и социальные аспекты. Важно также учитывать как глобальные, так и местные экологические проблемы, чтобы получить полное представление о будущих тенденциях развития. В статье приводится сравнение Голландского и Датского подходов. Форсайтные исследования в области «зеленых» технологий могут сыграть важную роль на национальном уровне, особенно при интеграции аспектов устойчивого развития в процессы разработки технологий и инноваций. Они также способствуют разработке более эффективных и устойчивых стратегий развития для компаний и правительства в Казахстане. Эти исследования способствуют повышению экологической осведомленности и осознанности в обществе относительно важности устойчивого развития. В ходе технологического прогнозирования ценится использование опросов Delphi, что способствует лучшему пониманию возможных тенденций будущего. Полученные знания являются основой для разработки стратегических планов в области «зеленых» технологий и обеспечения устойчивого развития энергетического сектора.

Ключевые слова: форсайтные исследования, «зеленые» технологии, возобновляемая энергетика, «зеленая» экономика, методы форсайтов.

ВВЕДЕНИЕ

Форсайтные исследования в области «зеленых» технологий приобретают стратегическое значение для выявления будущих тенденций и разработки стратегий, направленных на обеспечение устойчивого развития. В сфере «зеленых» технологий, становящейся все более значимой в контексте противостояния изменениям климата и ограниченности природных ресурсов, форсайтные исследования способны выявить потенциальные направления развития, а также возможности для инноваций и улучшений. Например, проекты, осуществляемые Европейской комиссией, активно исследуют проблемы, связанные с окружающей средой и устойчивостью [1–3]. Проекты, направленные на прогнозирование «зеленых» технологий, иллюстрируют, как процессы технологического прогнозирования могут быть адаптированы под конкретные цели и целевые группы. Исследования в рамках таких проектов охватывают множество аспектов, включая «зеленые» технологии, и их результаты используются для формирования планов действий на будущее. Эти проекты также фокусируются на предсказании технологических инноваций, связанных с окружающей средой, и их воздействии на будущие экологические и социальные сценарии. Исследования в рамках этих проектов помогают компаниям и организациям оценить, какие изменения в «зе-

леных» технологиях следует ожидать в ближайшие годы. Многие из таких проектов нацелены на разработку долгосрочных стратегий для устойчивого развития на глобальном уровне. Проводимые в рамках проектов исследования включают в себя анализ глобальных экологических тенденций, а также оценку перспектив развития «зеленых» технологий в различных регионах мира. Области, подверженные быстрым изменениям, такие как технологии, экономика, сельское хозяйство, энергетика и политика, часто полагаются на предсказания будущего для современного планирования и управления [2]. К примеру, представим сценарий, где медицинские специалисты могли бы предсказывать возможное возникновение сердечной недостаточности у человека и точное время, когда это могло произойти, что позволило бы провести неотложные меры заблаговременно. Аналогично, военные стратеги могли бы идентифицировать и предотвратить будущие военные конфликты. Хотя предвидение пандемии COVID-19 мировым правительством было бы чрезвычайно полезным, наука о форсайтах внесла свой вклад в управление мерами по борьбе с этой пандемией через сценарное планирование и моделирование эффективности общественно-защитных мер, таких как ношение масок и введение изоляции (локдауна). В зависимости от области и актуальных проблем, требующих решения, используются

разнообразные инструменты прогнозирования, такие как сканирование горизонтов, прогнозирование, сценарное планирование и статистическое моделирование [2]. Успешное применение научных методов прогнозирования в других областях делает этот подход привлекательным для решения экологических проблем [3]. Некоторые инструменты прогнозирования были использованы в контексте охраны природы и управления природными ресурсами. Однако наука о предвидении, как более обширная концепция, не получила широкого распространения, что подтверждается редким использованием данного термина в экологической литературе (рисунок 1).

В базе данных Web of Science был проведен поиск статей, содержащих фразу «форсайт-наука», с последующим уточнением по категории «Наука об окружающей среде». В статьях с 2010 года до 2022 года фраза встречалась менее чем в десяти публикациях в год [2]. Сегодня мы сталкиваемся с эскалацией кризисов биоразнообразия и климата, требующих долгосрочных решений. Антропогенные воздействия ускоряют природные процессы, создавая неопределенные угрозы, на которые необходимо быстро реагировать. Наука прогнозирования может ускорить и облегчить процесс принятия решений, предоставляя структуру и инструменты для систематизации сложных процессов принятия решений. Прогнозы также помогут в передаче передового опыта в области охраны природы и других экологических дисциплин. Использование науки прогнозирования позволяет готовиться к ожидаемым и неожиданным будущим условиям, основываясь на прогнозах для информирования природоохранных действий и способствуя сотрудничеству с заинтересованными сторонами [4]. Несмотря на преимущества науки прогнозирования, малое количество публикаций о форсайтах связано с определенными барьерами в их применении в науке. Для успешного внедрения науки прогнозирования в область охраны природы необходимо рассмотреть и

преодолеть выявленные препятствия. Барьеры можно классифицировать по трем категориям: доступность знаний, коммуникация и потенциал. Научные исследования в области охраны природы ведутся в академических кругах, правительственных учреждениях и неправительственных организациях, и преодоление каждого барьера требует уникальных решений в зависимости от ресурсов и власти каждого учреждения [2]. В современных условиях интересно изучение форсайта как эффективного инструмента для выявления новых стратегических научных направлений. Его цель – разработать алгоритм проведения качественной экспертизы при использовании методов форсайта с возможностью интеграции прогнозных оценок. В настоящее время большинство результатов научных исследований не способствуют инновационному развитию государства. Решение этой проблемы требует устойчивой системной связи между отраслями экономики и высшим образованием. Разработанный алгоритм базируется на системном подходе к методам предвидения, включая библиометрию, наукометрию, патентный анализ и прогнозирование [5].

На сегодняшний день в большинстве стран мира, таких как США, Япония, Австралия, Финляндия, Великобритания, Франция и др., методология форсайта зарекомендовала себя как наиболее эффективный инструмент выбора приоритетов в области науки и технологий. Применение форсайта распространяется на прогнозирование всех уровней научно-технологического развития и формирование средне- и долгосрочных стратегий развития экономики, науки и технологий с целью повышения их конкурентоспособности [5, 6]. Основная идея форсайта заключается в определении стратегических направлений развития науки, техники, экономики, социальной сферы и др., которые станут определяющими для развития государства и мирового сообщества через 15–20 лет [7, 8].

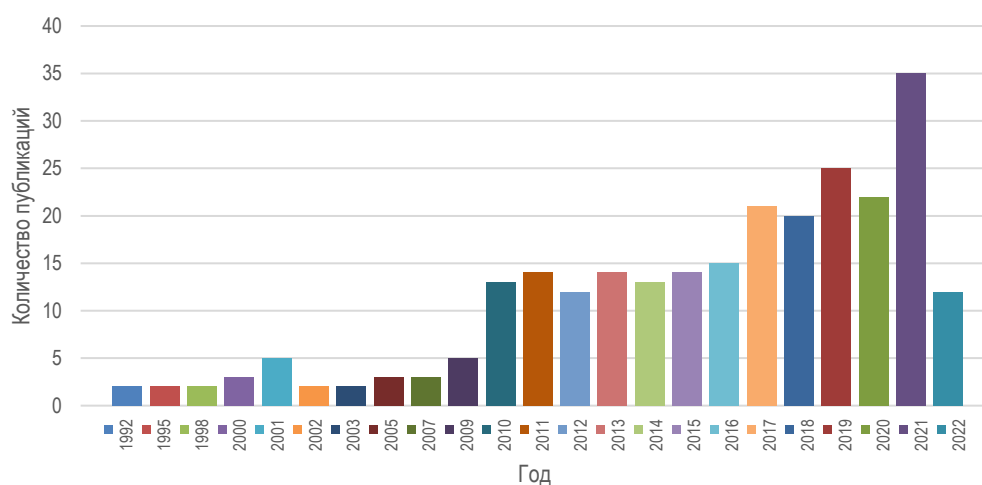


Рисунок 1. Количество публикаций по годам в базе данных Web of Science, содержащие фразу «форсайт-наука» в области науки об окружающей среде [2]

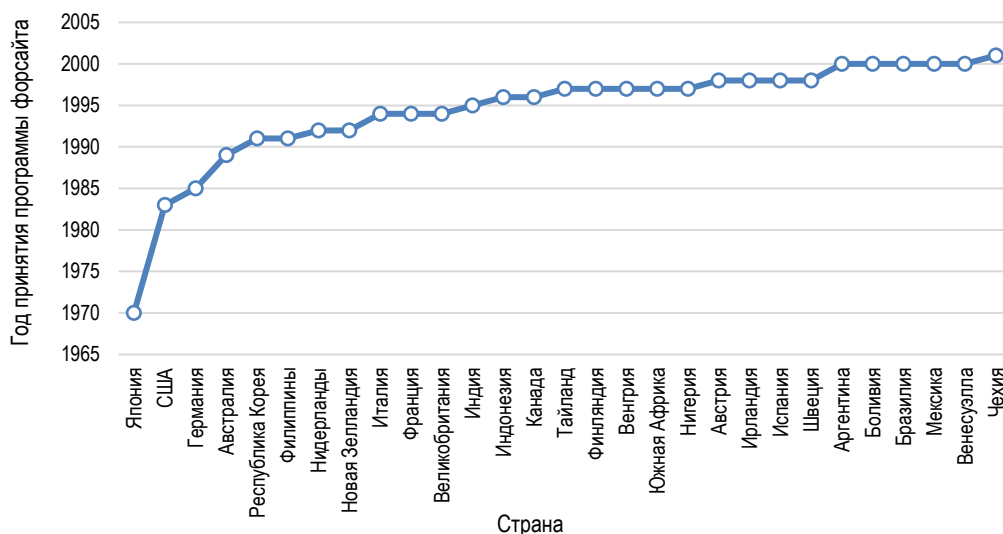


Рисунок 2. Развитие форсайта в мире [10]

Форсайт-исследования позволяют разрабатывать комплексные решения, охватывающие различные научные направления, виды экономической деятельности и компетенции должностных лиц и организаций. Важно отметить, что привлечение экспертов в разработку научно-технических прогнозов становится целесообразным, поскольку стандартные статистические методы и анализ больших данных не всегда способны предоставить средне- и долгосрочные прогнозные оценки и выработать сценарии развития области.

В работе [5] подчеркивается важность тщательного анализа научно-технических направлений, для чего предложен алгоритм определения приоритетных направлений науки, технологий и инноваций. Форсайт рассматривается как современная методология, дополненная прогнозной оценкой. Это позволяет заполнить пробел в исследованиях, посвященных форсайт-исследованиям, предполагая комплексный подход к решению этой проблемы.

В обобщении работ отечественных и зарубежных ученых можно сделать вывод, что применение методологии форсайта обусловлено ее преимуществами перед другими методами экспертного анализа. Оценки, включающие в себя качественную информацию, определение веса объектов, воссоздание объективной картины мнений специалистов и установление меры противоречивости суждений каждого эксперта, делают форсайт уникальным методом предвидения.

Несмотря на то, что в западных странах форсайт используется уже несколько десятилетий, в странах СНГ он получил распространение сравнительно недавно (рисунок 2).

Для прогнозирования будущего развития «зеленых» технологий необходимо использовать методы и инструменты, соответствующие глобальным тенденциям форсайта и адаптированные для исследования этих технологий с учетом их специфики. Среди наи-

более известных методов, применяемых в форсайте, выделяются методы Дельфи, сценариев, мозгового штурма, выявления критических технологий и разработки дорожных карт. Форсайт включает в себя разнообразные методы и инструменты, как созданные специально для прогнозирования будущего, так и заимствованные из области менеджмента, обусловленные междисциплинарным характером этой исследовательской области [11].

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ «ЗЕЛЕННЫХ» ТЕХНОЛОГИЙ

Оценка жизненного цикла (ОЖЦ) представляет собой системный методологический инструмент, целью которого является исследование воздействия продукта или технологической системы на окружающую среду на протяжении всего ее жизненного цикла. Этот цикл охватывает все этапы, начиная с извлечения сырья и производства, затем переходит к использованию, обслуживанию, и, наконец, завершается утилизацией или переработкой. Оценка жизненного цикла выходит за пределы традиционных методов оценки воздействия на окружающую среду, предоставляя более глубокое понимание экологических аспектов технологических решений. Основная роль ОЖЦ заключается в том, чтобы предоставить комплексную картину воздействия конкретного продукта или технологии на окружающую среду. Это включает в себя анализ выбросов в атмосферу, водные и земельные загрязнения, энергопотребление, и многие другие параметры. Подобный детальный анализ позволяет выявить потенциальные проблемные зоны и определить меры для минимизации негативных воздействий. Применение ОЖЦ в контексте прогнозирования «зеленых» технологий означает, что этот метод становится неотъемлемой частью стратегического анализа и планирования. В отличие от традиционных методов, оценивающих воздействие в определенный момент времени, ОЖЦ позволяет рассмот-

реть долгосрочные последствия технологических решений. Это особенно важно при прогнозировании, где учитываются долгосрочные тенденции и влияние технологий на будущее состояние окружающей среды. Применение ОЖЦ в контексте прогнозирования «зеленых» технологий означает, что этот метод становится неотъемлемой частью стратегического анализа и планирования. В отличие от традиционных методов, оценивающих воздействие в определенный момент времени, ОЖЦ позволяет рассмотреть долгосрочные последствия технологических решений. Это особенно важно при прогнозировании, где учитываются долгосрочные тенденции и влияние технологий на будущее состояние окружающей среды.

При проведении ОЖЦ выделяют несколько ключевых этапов:

1. Определение целей и границы оценки.
2. Сбор данных.
3. Анализ воздействия.
4. Интерпретация результатов.
5. Применение рекомендаций [12].

В сфере «зеленых» технологий активно исследуются и разрабатываются возобновляемые источники энергии, такие как солнечная, ветровая, гидро- и геотермальная энергия [13]. Применение методологий прогнозных исследований, таких как проект «Миллениум», способствует разработке идей и методологий для прогнозирования тенденций в «зеленых» технологиях [14]. В обобщении применение форсайта как инструмента государственного управления системами исследований и инноваций становится все более актуальным. Разнообразие методов форсайта обусловлено не только его широким спектром, созданным специально для прогнозирования будущего, но и заимствованным из области менеджмента. Технологическое прогнозирование, проводимое на европейском уровне и в нескольких странах, дает возможность систематического анализа и обсуждения возможного технологического будущего, в тесном взаимодействии с промышленной и инновационной политикой. Форсайт «зеленых» технологий (ФЗТ) представляет собой экологически ориентированный технологический прогноз и становится важной частью технологического прогнозирования в свете серьезных вызовов, связанных с экологией и климатом. Проблемы окружающей среды и устойчивого развития становятся центром внимания, создавая новые области интереса для научных исследований и технологических разработок. В реакции на эти вызовы рынок для экологических технологий становится все более значимым, что способствует интеграции научно-технологической политики с экологической политикой [16]. Форсайт-упражнения в области «зеленых» технологий обычно проводятся с участием представителей промышленности, научных областей и государственного управления, что способствует согласованию и интеграции ожиданий, знаний и перспектив

в различных сферах. Этот процесс способствует развитию сетей и преодолению установленных институциональных и отраслевых границ. Методологии, используемые в прогнозировании «зеленых» технологий, разнообразны, так как многие стандартные подходы к технологическому прогнозированию не всегда подходят для решения экологических проблем. Примеры проектов по прогнозированию «зеленых» технологий включают голландский прогноз с 81 вариантом, датский прогноз «зеленых» технологий, оценку жизненного цикла и технологическое прогнозирование. Форсайт «зеленых» технологий воспринимается как важный инструмент в управлении инновациями и промышленностью в направлении экологической устойчивости. Однако, традиционное технологическое детерминистское понимание инноваций всё еще преобладает, что делает необходимым разработку альтернативных и специализированных подходов. Прогнозирование «зеленых» технологий может сыграть ключевую роль в переходе к устойчивому развитию инновационных систем, предоставляя опыт, применимый в более широком контексте научных исследований и технологического планирования [16]. Важно отметить, что на данный момент примеров реального прогнозирования «зеленых» технологий еще недостаточно, и нельзя утверждать, что оно уже оказало значительное влияние на окружающую среду. Это обстоятельство создает ограничения в охвате всех внутренних стратегических процессов, таких как внутрикорпоративное планирование и исследовательская деятельность институтов. Однако мы можем рассмотреть процессы национальной и общественной политики в областях окружающей среды, технологий и науки, а также их интеграцию.

ПРОЕКТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ «ЗЕЛЕННЫХ» ТЕХНОЛОГИЙ

Форсайт и управление в обществе, ориентированном на изменения, в настоящее время тесно связаны с растущей культурой перемен [17]. Технологическое прогнозирование и спорные вопросы будущего играют ключевую роль в современных политических дебатах, формулировке повестки дня и борьбе за власть. Ожидания и обещания, связанные с будущим, становятся все более важными в деятельности по развитию науки и технологий на всех уровнях, включая политику и планирование, а также промышленные сектора и исследовательские программы. Понимание науки и знаний также претерпевает существенные изменения, где наука рассматривается как стратегический ресурс, подлежащий управлению и приоритизации. В этой ситуации технологическое прогнозирование, как систематический инструмент для решения будущих задач, стоит на переднем плане и привлекает высокий интерес. Значимость технологического предвидения также связана с ориентацией общества на технологии в целом, где развитие технологий и инноваций рассматриваются как ключевой фактор экономического роста и развития общества [18].

В последнее время климатические и экологические проблемы вызывают сомнения в неограниченном оптимизме относительно технологического развития. Недавние дискуссии о технологическом прогнозировании все более учитывают сложность развития технологий и их зависимость от множества различных факторов. Подчеркивается динамичная совместная эволюция между разными участниками и взаимная интеграция социальных и технологических аспектов. Поэтому форсайт, как инструмент, ориентированный на будущее, основан на философии, что будущее развитие зависит от действий и решений человека, и служит инструментом исследования пространства для человеческих действий и вмешательства с целью формирования будущего. Это направлено на формулирование ориентиров и руководство для всех участников, снижая неопределенность и интегрируя множество точек зрения на различных уровнях управления.

Однако на практике основное внимание уделяется методам, привлекающим научных и технологических экспертов, таким как «исследования Дельфи» и создание экспертных групп. Метод «исследования Дельфи» стал доминирующей парадигмой в области технологического прогнозирования, особенно в Европе, включая немецкую, британскую и японскую практику.

Технологическое прогнозирование и другие современные подходы к управлению представляют собой управление в рамках сетей субъектов, использующих их ресурсы. Однако стоит рассматривать технологическое прогнозирование прежде всего как практическую и прагматическую деятельность, методы и подходы которой еще не полностью разработаны и не подверглись систематическому анализу в рамках академических исследований.

Исследования влияния технологического предвидения на научно-исследовательскую политику указывают на то, что оно может оказывать незначительное воздействие или влиять в значительной степени, в зависимости от институциональных отношений, связанных с форсайтом. Например, в Нидерландах форсайт оказал существенное влияние на исследования в области устойчивых технологий и экологически ориентированную технологическую политику [19, 20].

Хотя воздействие технологического предвидения обычно ограничено в отношении отдельных прогнозных процессов, оно может стать важным, если станет стандартной практикой в политических, плановых и стратегических процессах, связанных с технологиями. Примером такой практики является датский прогноз по экологическим технологиям, в рамках национальной программы технологического прогнозирования, проведенной с начала 2001 года [21]. В рамках общей цели выявления и обсуждения технологий и научных прорывов, а также оценки возможностей и проблем с точки зрения Дании, конкрет-

ные задачи прогнозирования «зеленых» технологий включают в себя следующие этапы:

1. Карта глобальных экологических проблем:

1.1. Рассмотрение и выявление ключевых экологических проблем, представляющихся актуальными в перспективе 10–20 лет.

1.2. Включение аспектов поведения и потребления, способствующих ухудшению экологических проблем.

2. Технологические и институциональные решения:

2.1. Идентификация и обсуждение технологических и институциональных решений, способных справиться с выявленными экологическими проблемами.

3. Карта компетенций и потенциала датской промышленности и инновационной системы:

3.1. Оценка компетенций и потенциала датской промышленности и инновационной системы.

3.2. Учет экологических проблем, движущих сил и возможных решений при оценке потенциала.

4. Рекомендации по экологическим инновациям:

4.1. Предоставление рекомендаций по радикальным и выдающимся экологическим инновациям.

4.2. Формулирование рекомендаций относительно необходимых рыночных и политических инициатив для поддержки этих инноваций.

Процесс прогнозирования разбит на четыре этапа, каждый из которых соответствует конкретной цели. Большая часть времени уделяется интеграции результатов предыдущих этапов и определению «приоритетных областей». Форсайт организован в виде экспертной группы, состоящей из 18 членов с различным опытом в технологической, исследовательской и управленческой сферах [22]. Эта группа представляет различные секторы, включая представителей отраслевых компаний, государственных исследователей, представителей других организаций в инновационной сфере и экологических НПО, а также представителей крупных инвестиционных организаций и Министерства окружающей среды. Экспертная группа взаимодействует с консультативной группой и секретариатом, обеспечивая консультационную поддержку и подготовку материалов для процесса прогнозирования. Процесс прогнозирования в области экологических технологий завершается выделением и определением четырех или пяти «приоритетных областей», которые представляют собой рекомендации относительно технологических инноваций и возможностей для бизнеса, производства и потребления. Эти области выделяются на основе анализа экологических проблем, технологий, компетенций и бизнес-потенциала. Они ориентированы не только на отрасли промышленности, а на более узкие подотрасли, а в области знаний учитывают не только научные области, но и конкретные области исследований и разработок, а также их взаимодействие.

Выбранные направления, или «приоритетные области», включают:

1. Гибкие энергетические системы с увеличением использования ветряной энергии:

1.1. Фокус на энергетических системах, которые интегрируют гибкость и ветряную энергию для устойчивости.

2. Систематическая оптимизация энергопотребления в зданиях:

2.1. Работа над технологиями и методами для эффективного управления и снижения энергопотребления в строениях.

3. Более экологически чистое сельское хозяйство:

3.1. Точное сельское хозяйство – внедрение технологий для более точного и эффективного сельского хозяйства.

3.2. Органическое сельское хозяйство – развитие методов и технологий для органического сельского хозяйства.

4. Разработка экологически чистых продуктов и материалов:

4.1. Фокус на разработке продуктов и материалов с учетом их экологической чистоты.

Эти направления представляют сложные системы, интегрируя аспекты производства и использования с акцентом на технологических изменениях. Описания основных направлений включают тексты, в которых рассматриваются соответствующие научные и инновационные институты, промышленные кластеры, а также рыночные аспекты, стимулы и элементы регулирования. Важно отметить различия и сходства между голландским и датским форсайтом в области «зеленых» технологий. Например, голландский форсайт более симметричен в анализе экологических аспектов, включая положительные и отрицательные воздействия, в то время как датский форсайт сосредотачивается на потенциальных положительных воздействиях. Различия также касаются системной перспективы, временного аспекта, и формата организации, но оба метода акцентируют важность инноваций в области «зеленых» технологий [16]. ОЖЦ и методы технологического прогнозирования представляют собой два различных подхода, но их гибридное использование может быть полезным, особенно в области ветроэнергетики. Можно рассмотреть ключевые аспекты каждого из этих подходов и их возможную интеграцию:

1. Оценка жизненного цикла – это методология, фокусирующаяся на выявлении и анализе всех этапов и процессов, включенных в жизненный цикл продукта или технологической системы. ОЖЦ учитывает потоки материалов и энергии на каждом этапе, позволяя детально оценивать воздействие продуктов на окружающую среду. Помимо оценки экологического воздействия, ОЖЦ используется в стратегическом планировании, сценарных анализах и других долгосрочных процессах.

2. Методы технологического прогнозирования – это подходы, основанные на анализе технологических трендов, инноваций и развития в определенных областях. Методы, такие как опросы Delphi, мозговой штурм и другие, анализируют будущие технологии, часто сосредотачиваясь на ключевых технических функциях. Фокусируются они на прогнозировании будущих технологических изменений и инноваций.

3. Интеграция ОЖЦ и методов технологического прогнозирования в ветроэнергетике позволяет учесть экологические аспекты будущих технологий с самого начала проекта. ОЖЦ помогает поддерживать фокус на экологических аспектах на протяжении всего жизненного цикла технологии. Интеграция ОЖЦ может ограничить проект текущим социотехническим контекстом, что может не учитывать новые технологические тренды. Внедрение детального анализа ОЖЦ может привести к увеличению степени неопределенности на ранних этапах проекта. Вовлечение экологических и технологических экспертов может помочь в структурировании интегрированного подхода. Можно разработать методологию, которая сочетает детализированный анализ ОЖЦ с абстрактным технологическим прогнозированием.

Итак, интеграция концепции ОЖЦ в методы технологического прогнозирования может предоставить важные преимущества, учитывая экологические аспекты будущих технологий. Однако, при этом, необходимо тщательно управлять рисками и ограничениями, чтобы обеспечить эффективность проекта. Принцип предосторожности и методы технологического прогнозирования предоставляют сбалансированный взгляд на будущие экологические риски потенциальных технологий. Эти два подхода дополняют друг друга, учитывая как положительные, так и отрицательные аспекты развития технологий. Это создает более полное понимание возможных последствий и помогает принимать информированные решения на политическом и оперативном уровне. Основные различия между принципом предосторожности и технологическим прогнозированием в том, что последнее обычно уделяет больше внимания положительным аспектам развития технологий, подчеркивая их потенциал и перспективы. Принцип предосторожности, напротив, смотрит более скептически и критически на новые технологии, фокусируясь на возможных негативных последствиях [23].

Интеграция этих подходов в один проект обеспечивает более всесторонний анализ экологических аспектов будущих технологий. Технологическое прогнозирование при этом может выявлять потенциал развития и инноваций, в то время как принцип предосторожности напоминает о возможных рисках и необходимости управления ими.

Проект форсайта представляет собой гибкий процесс, который требует адаптации методологии в зависимости от специфики исследуемых проблем. Ва-

жно сохранять общие методологические рамки для обеспечения согласованности всего проекта, особенно если целью является создание общего набора сценариев для конкретной отрасли, такой как энергетика в Польше. Процесс форсайта, начинающийся с обзора литературы и анализа доступных материалов, представляет собой систематичный подход к сбору информации. Разработка технологических баз данных и выделение ключевых технологий являются важными этапами, которые обеспечивают основу для дальнейшего анализа и прогнозирования. Исследования в области прогнозирования «зеленых» технологий представляют интерес для области технологического прогнозирования на различных уровнях, включая национальный и европейский. Влияние на конкретную перспективу и адаптация методологических принципов под конкретные цели и целевые группы являются ключевыми аспектами успешных проектов в этой области. Наконец, учет локальных экологических проблем в процессе форсайта, связанного с «зелеными» технологиями, крайне важен. Это помогает избежать упущения значимых возможностей и неопределенности, связанных с глобальными отчетами и точками зрения. Такой интегрированный и местноориентированный подход способствует более реалистичному взгляду на будущее «зеленых» технологий.

Анализируя подходы форсайтов разных стран, можно выделить несколько ключевых наблюдений:

1. Сложная взаимосвязь между технологиями, окружающей средой и социальными вопросами, а именно – прогнозирование «зеленых» технологий уделяет внимание взаимосвязи между технологиями, окружающей средой и социальными аспектами. Это отражает более широкий и комплексный взгляд на будущее, включая устойчивость и социальные последствия.

2. Особенности практик Голландии и Дании:

Нидерландская практика акцентирует внимание на интеграции экологических аспектов в технологическую политику.

Датская практика охватывает интеграцию экологических проблем в общую технологическую и инновационную политику.

3. Опрос Delphi считается ценным инструментом, особенно в условиях ограниченных или неопределенных знаний о предметной области. Два раунда опроса Delphi предоставили как качественную, так и количественную информацию, оказавшую влияние на формирование сценариев и стратегических планов.

4. В Казахстане интерес к применению форсайта проявляется в контексте разработки стратегий развития различных отраслей. Проекты «Казахстан-2030» и «Казахстан-2050» являются подобием использования форсайта для анализа технологических и социальных трендов.

5. Форсайты начинают активно развивать инновационную сферу в Казахстане. Применение инстру-

ментов прогнозирования технологий в стратегическом планировании подчеркивает стремление к более осознанному и устойчивому использованию ресурсов.

6. В Казахстане, как и в других странах, использование форсайта становится важным элементом стратегического планирования и управления устойчивым развитием.

Это направление способствует более осознанному и устойчивому использованию ресурсов, что является ключевым фактором в обеспечении устойчивого экономического и экологического развития. Обобщенно, подходы к форсайту демонстрируют эволюцию в направлении более глубокого понимания сложных взаимосвязей между технологиями, обществом и окружающей средой, а также стремление к разработке стратегий, учитывающих экологическую устойчивость и социальные аспекты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современном контексте изучения подходов форсайтов разных стран можно сделать вывод, что прогнозирование «зеленых» технологий представляет собой перспективный метод управления устойчивым развитием. Эти методы ориентированы на комплексный анализ взаимосвязи между технологиями, окружающей средой и социальными вопросами, в отличие от традиционного подхода, не учитывающего экологические аспекты. Особенности подходов Голландии и Дании к интеграции экологических аспектов в технологические политики демонстрируют, что страны придают большое значение устойчивому развитию, внедряя принципы экологической устойчивости в процессы разработки технологий и инновационные системы. Исследования в этой области играют важную роль на национальном и европейском уровнях, способствуя интеграции принципов устойчивого развития в процессы создания технологий и инновационные системы. Примером является проект технологического прогнозирования для энергетического сектора в Польше, который выявил мотивацию в использовании этого метода через успешные реализации аналогичных проектов в других странах и стремление применить альтернативные методы сбора данных для разработки стратегий планов. Проекты прогнозирования «зеленых» технологий являются ярким примером того, как методы технологического прогнозирования могут быть адаптированы под конкретные цели и аудиторию. Важно учитывать как глобальные, так и локальные экологические проблемы, чтобы обеспечить более полное представление о будущем, а также поддерживать устойчивое развитие. В Казахстане инновационная сфера активно развивается, и методы прогнозирования будущих технологий, включая форсайт-исследования, внедряются для разработки стратегий развития различных отраслей. Эти исследования становятся все более популярными, способствуя более осмысленному и устойчивому

управлению ресурсами, что играет ключевую роль в обеспечении стабильного экономического и экологического прогресса в стране.

Благодарности

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, Договор на проведение форсайтных исследований по развитию науки в рамках реализации Национального проекта «Технологический рывок за счет цифровизации, науки и инноваций» № 175, от 30 мая 2023 года.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Becker P., Corporate Foresight in Europe: A First Overview, Germany: Institute for Science and Technology Studies University of Bielefeld, 2002. – P.31.
2. Ednie G., Kapoor T., Koppel O., Piczak M., Reid J., Murdoch A., Cook C., Sutherland W., Cooke S. Foresight science in conservation: Tools, barriers, and mainstreaming opportunities // *Ambio*. – Volume 52. – 2023. P. 412–424. <https://doi.org/10.1007/s13280-022-01786-0>
3. Calof J., Smith J. Foresight impacts from around the world: a special issue // *Foresight*. – Volume 14. – Issue 1. – 2012. – P. 5–14.
4. Adams V., Douglas M., Jackson S., Scheepers K., Kool J., Setterfield S. Conserving biodiversity and Indigenous bush tucker: Practical application of the strategic foresight framework to invasive alien species management planning // *Conservation Letters*. – Volume 11. – Issue 4. – 2018. – P. 12441. <https://doi.org/10.1111/conl.12441>
5. Zhanbayev R., Sagintayeva S., Abildina A. and Nazarov A. The Use of the Foresight Methods in Developing an Algorithm for Conducting Qualitative Examination of the Research Activities Results on the Example of the Republic of Kazakhstan // *Mathematics 2020*. – Volume 8. – 2024. – P. 19.
6. Brumer V., Konnola T., Salo A. Diversity in Foresight Research. The Practice of Selecting Innovative Ideas // *Foresight and STI Governance*. – Volume 4. – Issue 4. – 2011. P. 56–68.
7. Tapinos E., Pyper N. Forward looking analysis: Investigating how individuals do' foresight and make sense of the future // *Technol. Soc. Chang*. – Volume 126. – 2018. – P. 292–302.
8. Danova M.A. Priority selection technique for predicting the scientific and technological development of large-scale facilities based on the Foresight technology // *Aerosp. Eng. Technol*. – Volume 7. – 2013. P. 227–231.
9. Shvaytser E., Merser M. Science and Technology in Kazakhstan – Status and Prospects // *Foresight*, Publishing House “NIU” Higher School of Economics: Moscow: Russia, 2007.
10. UNIDO Technology Foresight Manual: Technology Foresight in Action. - Volume 2. – Vienna. - 2005. P. 288.
11. UNIDO Foresight Metodologies. Mode of access: http://www.strast.cz/dokums_raw/foresightmethodologies_1168269318.pdf
12. Стандарты ISO 14040 и ISO 14044 Международной организации по стандартизации (ISO). [Standarty ISO 14040 i ISO 14044 Mezhduнародnoy organizatsii po standartizatsii (ISO).]
13. Vakulchuk R., Overland I., Scholten D. Renewable energy and geopolitics: A review The National Aeronautics and Space Administration Renew // *Sustain. Energy Rev*. – Volume 122. – 2020. P. 1–39. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109547>
14. Glenn, J. C., Gordon, T. J., & Florescu, E. State of the future. Millennium Project: Washington.: 2011. P. 100.
15. IPCC Assessment Open-File Report 2022.
16. Borup M. Green Technology Foresight as Instrument in Governance for Sustainability, Section D: Technologies for Sustainability Transformation. – 2005. – P. 24.
17. Giddens A., Pierson C. Conversations with Anthony Giddens: Making Sense of Modernity. Cambridge: Polity Press Stanford University Press. – 1998. – P. 233.
18. Nowotny H., Scott P., Gibbons M. Re-Thinking Science, Cambridge: Polity Press. – 2001. – P. 288.
19. Meulen B. The impact of foresight on environmental science and technology policy in the Netherlands // *Futures*. – Volume 31. – 1999. – P. 7–23.
20. Meulen B., Löhnberg A. The use of foresight: institutional constraints and conditions // *International Journal of Technology Management*. – Volume 21. – Issue 7/8. – 2001. – P. 680–693.
21. Product-oriented environmental efforts in the agricultural sector – prerequisites (Denmark) Open-File Report, 2004. – P.204.
22. Czaplicka-Kolarz K., Stańczyk K., Kapusta K. Technology foresight for a vision of energy sector development in Poland till 2030. Delphi survey as an element of technology foresighting // *Technological Forecasting & Social Change*. – Volume 76. – 2009. – P. 327–338.
23. Hellström T. Systemic innovation and risk: technology assessment and the challenge of responsible innovation // *Technology in Society*. – Volume 25. – 2003. – P. 369–84.
24. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K1200002050>

**ҚАЗАҚСТАН ЖАҒДАЙЫНДА ОЛАРДЫҢ ТӘЖІРИБЕСІН ҚАБЫЛДАУ ҮШІН ҒЫЛЫМ
МЕН ЖАСЫЛ ТЕХНОЛОГИЯЛАРДЫҢ ДАМУЫН ФОРСАЙТТЫҚ ЗЕРТТЕУЛЕРДЕ
ЕУРОПА ЕЛДЕРІНІҢ ТӘСІЛДЕРІН ЗЕРТТЕУ**

Д. И. Бакранова^{1*}, А. С. Серікқанов², А. С. Жұмаділдаев², К. Е. Оразалиев²

¹ *Қазақ-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан*

² *Қазақстан Республикасы Президентінің жанындағы Қазақстан Республикасының
Ұлттық Ғылым Академиясы, Алматы, Қазақстан*

**Байланыс үшін E-mail: dinabakranova@gmail.com*

Бұл жұмыс Қазақстанда болашақта қолдану үшін ең қолайлы тәсілдерді анықтау мақсатында ғылым саласында, әсіресе әртүрлі еуропалық елдерде жасыл технологияларды дамытуда форсайт әдістерін қолдануды қарастырады. Талдау көрсеткендей, жасыл технологияны болжау тұрақты дамуды басқарудың тиімді құралы болуға уәде береді. Жасыл технологияларды болжау әдістері қоршаған орта мен әлеуметтік аспектілерді ескере отырып, жүйелі көзқарас пен кешенді шешімдерге бағытталған. Сондай-ақ болашақ даму тенденцияларын толық түсіну үшін жаһандық және жергілікті экологиялық мәселелерді қарастыру маңызды. Мақалада голландтық және даттық тәсілдерді салыстыру қарастырылған. Жасыл технологияларды болжау зерттеулері ұлттық деңгейде маңызды рөл атқара алады, әсіресе тұрақтылық мәселелерін технологияларды дамыту мен инновациялық процестерге біріктіруде. Олар сондай-ақ Қазақстандағы компаниялар мен үкіметтің неғұрлым тиімді және тұрақты даму стратегияларын әзірлеуге ықпал етеді. Бұл зерттеулер тұрақты дамудың маңыздылығы туралы қоғамның экологиялық хабардарлығы мен хабардарлығын арттыруға ықпал етеді. Технологияларды болжау болашақ тенденцияларды жақсырақ түсінуді қамтамасыз ету үшін Delphi сауалнамасын пайдалануды бағалайды. Алынған білім жасыл технологиялар саласындағы стратегиялық жоспарларды әзірлеу және энергетикалық сектордың тұрақты дамуын қамтамасыз ету үшін негіз болып табылады.

***Түйін сөздер:** форсайт зерттеулері, жасыл технологиялар, жаңартылатын энергия, жасыл экономика, форсайт әдістері.*

**STUDYING THE APPROACHES OF EUROPEAN COUNTRIES IN FORESIGHT STUDIES
OF THE DEVELOPMENT OF SCIENCE AND GREEN TECHNOLOGIES FOR ADOPTING
THEIR EXPERIENCE IN THE CONTEXT OF KAZAKHSTAN**

D. I. Bakranova^{1*}, A. S. Serikkanov², A. S. Dzhumadildaev², K. E. Orazaliyev²

¹ *Kazakh-British technical university, Almaty, Kazakhstan*

² *National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan under the President
of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan*

**E-mail for contacts: dinabakranova@gmail.com*

This paper reviews the application of foresight methods in the field of science, especially in the development of green technologies in various European countries, with the aim of identifying the most suitable approaches for future use in Kazakhstan. The analysis shows that green technology forecasting promises to be an effective tool for managing sustainable development. Methods for forecasting green technologies are focused on a systematic approach and integrated solutions, taking into account the environment and social aspects. It is also important to consider both global and local environmental issues to gain a full understanding of future development trends. The article provides a comparison of the Dutch and Danish approaches. Green technology foresight research can play an important role at the national level, especially in integrating sustainability considerations into technology development and innovation processes. They also contribute to the development of more effective and sustainable development strategies for companies and government in Kazakhstan. These studies contribute to increasing environmental awareness and awareness in society regarding the importance of sustainable development. Technology forecasting values the use of Delphi surveys to provide a better understanding of possible future trends. The knowledge gained is the basis for developing strategic plans in the field of green technologies and ensuring sustainable development of the energy sector.

***Keywords:** foresight research, green technologies, renewable energy, green economy, foresight methods.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-13-23>

УДК 621.793

КРАТКИЙ ОБЗОР СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ TiSiCN И МЕТОДА РЕАКТИВНО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Д. С. Баймолданава^{1,2*}, Б. К. Рахадиллов^{1,2}, А. Кенесбеков¹, А. Кусайнов^{1,2}, А. Маулит^{1,3}

¹ Plasma Science LLP, Усть-Каменогорск, Казахстан

² Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

³ Университет имени Шакарима города Семей, Казахстан

*E-mail для контактов: lyazbs_82@mail.ru

Современное материаловедение ставит перед собой задачу разработки новых материалов с многофункциональными покрытиями. Материалы с такими покрытиями имеют широкое применение в различных областях техники: в строительстве и энергетике, в микроэлектронике, в авиации и других. Основной причиной возникновения и развития технологии нанесения многофункциональных защитных покрытий является стремление повысить долговечность деталей и узлов различных механизмов машин. Износостойкие твердые покрытия на основе нитридов переходных металлов и карбонитридов широко используются для увеличения срока службы штампов дляковки и экструзии, а также высокоскоростных обрабатывающих инструментов. За последние два десятилетия широкое распространение этих покрытий стимулировало и поддерживало разработку новых процессов и материалов в попытке дальнейшего улучшения их свойств. Среди этих покрытий более высокая твердость, отличная стойкость к окислению и высокая термическая стабильность покрытий, таких как TiSiN и TiSiCN, делают их наиболее перспективными кандидатами для трибологических приложений с высокими требованиями. Кроме того, покрытие TiSiCN является перспективным материалом, используемым в морской среде, благодаря его превосходной противоизносной и коррозионной стойкости, а также высокой твердости и низкому коэффициенту трения. Такие сочетания свойств делают покрытия TiSiCN потенциальными кандидатами на получение защитного слоя в автомобильной и нефтяной промышленности.

В статье кратко рассмотрены возможности получения покрытий TiSiCN разными методами осаждения для управления свойствами получаемых пленок и особенности метода реактивно-плазменного напыления. В работе описываются самые распространенные способы и технологии получения карбонитридных покрытий, используемые в настоящее время. Рассматриваются последние разработки и актуальные тенденции в области технологий плазменного напыления покрытия, при этом учитываются важные новации для промышленных покрытий. На них базируются новые выводы, которые были получены в результате фундаментальных и прикладных исследований физики или химии. В статье проведен сравнительный обзор характеристик получения износостойких покрытий TiSiCN и особенности применения реактивно-плазменного напыления для получения износостойких покрытий. На основании анализа литературы можно утверждать, что дальнейшее развитие технологии реактивной плазмы связано с разработкой нового ресурсосберегающего способа формирования композиционных покрытий с повышенными коррозионными и трибологическими характеристиками, что соответствует тенденциям развития мировой науки.

Ключевые слова: плазменное напыление, TiSiCN, карбонитридные покрытия, износ, коррозия, процессы нанесения покрытий, реактивно-плазменное напыление.

ВВЕДЕНИЕ

В качестве лидирующих сегодняшних технологий нанесения износостойких покрытий для металло-режущих инструментов используются процессы химического и физического осаждения из газовой фазы. В технологиях физического осаждения из газовой фазы исходные материалы за счет испарения или напыления переводятся в газовую фазу, которая имеет тот же состав что и покрытие. Но сам процесс осуществляется исключительно в вакууме.

Из анализа результатов исследования в области осаждения покрытий известно, использование химического осаждения из газовой фазы дает наибольшую твердость и хорошую адгезию к подложке. Разные способы осаждения и получения покрытий и их свой-

ства зависят от технологических параметров, в том числе от давления и температуры (рисунок 1). Для осаждения покрытий использование реагентов для образования газовой фазы и снижение температуры нагрева изделия в химическом процессе возможно путем плазменной активации (рисунок 1) [1]. Снижение температуры процесса способствует устранению негативных явлений, связанных с тепловыми эффектами, и возможности использования широкого спектра различных базовых материалов.

PVD- и CVD-технологии являются хорошо зарекомендовавшими себя технологиями, которые широко используются для нанесения тонких пленок. Однако технологии физического осаждения из газовой фазы и химического осаждения из газовой фазы не

могут обеспечить требования к эксплуатационным характеристикам компонентов, используемых в жестких условиях эксплуатации. Это связано с тем, что при использовании методов физического осаждения из газовой фазы и химического осаждения из газовой фазы толщина покрытия очень ограничена. Кроме того, скорость роста PVD- и CVD-покрытий очень низка.

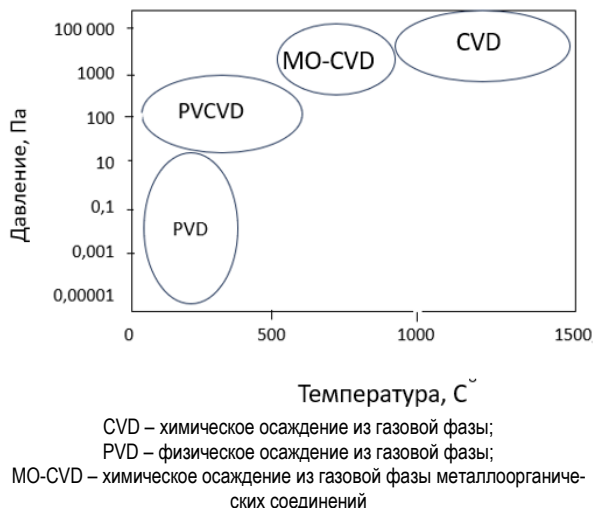


Рисунок 1. Способы осаждения и зависимость их от технологических параметров [1]

Покрытия из нитридов и карбонитридов переходных металлов, таких как TiN, TiC и Ti(CN), широко используются благодаря высокой твердости и отличной износостойкости. Однако присущие им недостатки, такие как низкая стойкость к окислению и хрупкость, ограничивают их дальнейшее применение. Поэтому для повышения стойкости к окислению был предложен ряд методов, одним из которых является включение в покрытие второй фазы Si, являющийся потенциальным легирующим элементом, может повысить термическую стабильность и твердость. Среди таких покрытий TiSiN [2–4] и TiSiCN [5, 6] являются наиболее перспективными кандидатами для сложных трибологических применений, где поверхности контакта подвергаются экстремальным условиям трения, износа и температур. Кроме того, покрытия TiSiCN являются перспективными материалами для морских применений благодаря их высокой твердости [7] и низкому коэффициенту трения [8], а также отличной износостойкости, стойкости к окислению и коррозии [9–11]. Совокупность этих свойств делает покрытия TiSiCN потенциальными кандидатами на получение защитных покрытий в автомобильной и нефтяной промышленности.

В последнее время возрос интерес к покрытиям из нитрида титана с добавлением кремния, включая TiSiCN, из-за высокой твердости и других механических преимуществ. TiSiCN может быть получен как методом физического осаждения из газовой фазы, так и методом химического осаждения из газовой фа-

зы, покрытие обычно признается как твердый и низкофрикционный слой, с почти одинаковыми трибологическими и механическими свойствами в обоих процессах.

Целью данной статьи является анализ исследований ученых в области технологии и разработки методов получения многокомпонентных нитридных и карбонитридных покрытий и изучения основных механизмов формирования этих покрытий, также метод напыления реактивно плазменным путем.

1. СПОСОБЫ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КАРБОНИТРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Нанокompозиты на основе TiN исследовались учеными преимущественно с включением кремния или углерода. В таблице 1 приведены некоторые исследования по получению нанокompозитных покрытий, где применены разные методы получения покрытий TiSiCN, такие как магнетронное напыление, катодно-дуговое осаждение, электродуговое ионное осаждение, плазменное магнетронное распыление и плазменно-химическое осаждение. Магнетронное распыление и плазменное химическое осаждение из паровой фазы впервые были использованы для получения нанокompозитных пленок из-за простоты контроля соотношения состава, поскольку для создания структуры нанокompозита важен точный контроль дополнительных компонентов. Например, нанокompозитные пленки Ti-Si-N показали максимальную твердость при содержании Si 9 ± 1 ат.% [12]. После этого к нанокompозитным покрытиям применялся вакуумно-дуговой разряд, поскольку вакуумно-дуговой процесс имеет много преимуществ по сравнению с другими процессами химического осаждения из газовой фазы или физического осаждения из газовой фазы. Плазма вакуумной дуги имеет высокую степень ионизации более 90%.

По сделанному анализу и таблице 1 нанокompозитные покрытия TiSiN и TiSiCN представляют собой материалы, состоящие из нанокристаллического TiN или TiC_xN_y с размером кристаллов менее 100 нм и окружающей аморфной фазы. Такие нанокompозиты обладают превосходными механическими и трибологическими свойствами. В этом случае соотношение Холла-Петча справедливо, с уменьшением размера кристаллитов увеличивается твердость композита. Однако, Verrek и др. [16] показали, что нанокompозиты TiSiN имеют высокую устойчивость к образованию трещин. Вместе с тем, покрытия TiSiN могут достигать стойкости к окислению > 800 °C в зависимости от их состава. Исследования показали, что покрытия TiSiCN имеют аналогичную твердость, но более низкий коэффициент трения, чем TiSiN [16]. Обычно такие нанокompозиты наносят при низких температурах, и исследований с использованием термического химического осаждения из газовой фазы немного.

**КРАТКИЙ ОБЗОР СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ TiSiCN
И МЕТОДА РЕАКТИВНО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

Таблица 1. Сравнительный обзор получения износостойких покрытий TiSiCN разными методами

Метод получения	Технология получения покрытия	Результаты исследований	Ссылка
Магнетронное напыление	Мощность 300 Вт. Базовое давление до $5,0 \cdot 10^{-4}$ Па. Расходы Ar и N ₂ составляли 38 и 5 см ³ /мин. Рабочее давление составляло 0,4 Па. Температура до 573 К, скорость 10 об/мин.	Толщина пленок TiSiCN около 2 мкм, высокая твердость в диапазоне от 32 ГПа до 105 ГПа.	[5]
Вакуумно-дуговое осаждение	Покрытия TiSiCN были нанесены на сплав Ti ₆ Al ₄ V методом дугового ионного осаждения (Hauzer Flexicoat 850). Подложки из сплава Ti ₆ Al ₄ V шлифовали наждачной бумагой от 1000 до 7000, а затем полировали алмазной шлифовальной пастой с размером частиц 0,5 мкм. Кроме того, кремниевая пластина (p-типа (100) с размерами 10 мм×10 мм×0,625 мм также была закреплена на подложке для синхронного нанесения покрытия TiSiCN, что обеспечило дополнительные образцы для анализа микроструктуры.	Покрытие (11,9 ат.% C) обладает максимальной твердостью 39,8 ГПа и наилучшей стойкостью к трибокоррозии, что обусловлено особой структурой нанокompозита, а также меньшим коэффициентом трения покрытия TiSiCN. TiCN и TiSiN, обладают высокой твердостью, превосходной износостойкостью.	[9]
Химическое осаждение из газовой фазы	Покрытия получали при разных температурах от 650 °C до 1450 °C. Нанокompозиты TiSiN получают со смесью прекурсоров TiCl ₄ , SiCl ₄ и NH ₃ , тогда как для покрытий TiSiCN вместо NH ₃ добавляется ацетонитрил.	По результатам твердость составила около 3700 HV[0,01]. По сравнению с TiSiN была измерена еще более высокая твердость до 4100 HV[0,01]. Покрытия TiSiN с содержанием кремния от 5,5 до 7,7 ат.% обладают стойкостью к окислению до 700 °C. Но TiSiCN с содержанием кремния 2,2–11,7 ат.% еще более стабилен до 900 °C.	[11]
Катодно-дуговое осаждение	Покрытия получали катодно-дуговым осаждением с использованием одного катода, изготовленного из Ti 88 ат.%-Si 12 ат.% (чистота 99,99%).	Наилучшая коррозионная стойкость, ГЦК структура твердого раствора с преимущественной ориентацией (111). Хорошая стойкость к коррозионному воздействию в 3,5% растворе NaCl.	[13]
Электродуговое ионное осаждение	Покрытия TiSiCN были получены с помощью электродугового ионного осаждения с мишенями TiSi (90 ат.% Ti, 10 ат.% Si; чистота 99,99 ат.%) в газовой атмосфере C ₂ H ₂ /N ₂ /аргон. Камеру откачивали до фонового давления ниже $4 \cdot 10^{-3}$ Па, после чего подложки очищали травлением с отрицательными напряжениями смещения 900 В, 1100 В и 1200 В соответственно.	Покрытие имеет сопряженную структуру нанокристалла TiCN и аморфной фазы (Si ₃ N ₄ и SiC). Покрытие TiSiCN имеет сверхвысокую твердость 51 ГПа и модуль 548 ГПа. Значения H/E и H ³ /E ² покрытий TiSiCN составляют от 0,103 до 0,465 соответственно. Покрытие TiSiCN имеет низкий коэффициент трения 0,3.	[14]
Магнетронное напыление	Пленки TiSiCN напылялись из составных мишеней TiSiC (ат.%, 99,99%) диаметром 75 мм в радиочастотном (ВЧ) режиме при мощности 300 Вт. Базовое давление откачивали до $5,0 \cdot 10^{-4}$ Па перед осаждением. Расходы Ar и N ₂ составляли 38 и 5 см ³ /мин соответственно. Рабочее давление составляло 0,4 Па, а подложка нагревалась до 573 К во время осаждения. Для улучшения однородности пленок подложку вращали со скоростью 10 об/мин.	Толщина всех пленок TiSiCN составляла около 2 мкм. Максимальная твердость и модуль упругости 46,1 ГПа и 425 ГПа соответственно. Упрочняющий эффект нанокompозитной пленки TiSiCN можно отнести к механизму усиления когерентного интерфейса, который выражается в виде модели «nc-TiN/c-Si ₃ N ₄ /c-C/c-CNx».	[15]

В работах [17, 18] композитные покрытия Si₃N₄-TiN получали при температуре от 1050 °C до 1450 °C [17, 18]. При 1050 °C был получен композит, состоящий из нанокристаллического TiN с содержанием 31,1 мас. % в аморфной матрице Si₃N₄. При температурах, равных или превышающих 1250 °C, матрица Si₃N₄ является кристаллической. Пленки в этом случае показали улучшенную устойчивость к окислению. Химическое осаждение из газовой фазы при атмосферном давлении TiSiN и TiSiCN в различных температурных диапазонах исследовали Куо и др. [19, 20]. Осаждение покрытий TiSiN газовой смесью TiCl₄, SiCl₄, NH₃ и Ar проводили в интервале температур от 650 до 800 °C [21]. Был сформирован композит TiN/аморфный Si₃N₄ с максимальной твердостью 21,5 ГПа при 800 °C. Однако детальный структурный анализ не проводился. В следующей публикации Куо и Хуанг [22–24] исследовали химическое осаждение из газовой фазы четырехкомпонентных покрытий Ti-Si-C-N в диапазоне 700–1100 °C с использованием TiCl₄, SiCl₄, C₂H₂, H₂, N₂ и Ar в качестве исходных газов. Полученные отложения представляют собой твердый раствор (Ti,Si)(C,N) со структурой TiC. Так-

же исследователи применили другой процесс химического осаждения из газовой фазы в диапазоне 650–800 °C с использованием TiCl₄, SiCl₄, C₂H₂, NH₃ и Ar [20]. Получили покрытия TiSiCN с низким содержанием углерода и наноразмерной микроструктурой. Низкое содержание углерода обусловлено более высокой реакционной способностью NH₃ по сравнению с C₂H₂.

Джонсон и др. [13] исследовали TiSiCN с различным процентным содержанием Si и C на цементированной карбидной подложке; присутствие кремния развило наноструктуру с оптимальными механическими свойствами, полученными в покрытии при C/(C+N)=0,27. Было исследовано покрытие TiSiCN с целью снижения износа поршневых колец. Покрытие было получено методом напыления на подложку из нержавеющей стали; оптимальный состав покрытия составил 43,3% Ti, 2,3% Si, 29% C и 25,3% N, что не соответствует результатам других исследований.

В работе [14] были исследованы микроструктура, состав, свойства и поведение при окислении нанокompозитных покрытий. Покрытия TiSiCN, полученные ацетонитрильным способом, имели нанокompо-

зитную структуру из нанокристаллического TiC_xN_y и аморфного SiC_xN_y . По сравнению с TiSiN была измерена еще более высокая твердость до 4100 HV при содержании кремния 11,7 ат.%. Покрытия TiSiN с содержанием кремния от 5,5 до 7,7 ат.% обладают стойкостью к окислению до 700 °C. Но TiSiCN с содержанием кремния 2,2–11,7 ат.% еще более стабилен до 900 °C. По результатам видно, что при осаждении покрытия большую роль играет температура, также увеличение скорости осаждения обнаруживает эффект, во многом сходный с наблюдаемым при повышении температуры (таблица 1).

2. ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ TiSiCN, НАПЫЛЕННЫХ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ

При сравнении покрытий TiSiCN и TiN, полученные способами плазменного химического осаждения из газовой фазы и физического осаждения из газовой фазы, покрытие TiSiCN показало более высокую твердость, чем покрытие TiN. Скользящее трибологическое поведение покрытий по алюминиевым и глиноземным аналогам изучалось как на воздухе, так и в хладагенте (Hangsterfer's S-500) методом штифт-диск. Охлаждающая жидкость для резки обеспечивала смазочный эффект и уменьшала адгезию и коэффициент трения между покрытием и контрагентом.

Оба покрытия показали хорошую адгезию, хотя их толщина (17–45 мкм) была намного больше, чем другие карбонитридные покрытия. Покрытия TiCN имеют более высокую твердость и лучшую износостойкость по сравнению с покрытиями TiN или TiC. Более высокая механическая твердость покрытий TiCN (по сравнению с TiN) объясняется твердорастворным упрочнением атомами углерода, а лучшая износостойкость – высокой микротвердостью и плотной морфологией [5–9].

Четырехкомпонентные покрытия TiSiCN, нанесенные химическим осаждением из паровой фазы, магнетронным распылением или гибридным методом осаждения, сочетающим методы дугового ионного покрытия и магнетронного распыления на постоянном токе в основном имеют хорошие трибологические свойства [3–10]. Например, Jun-На Jeon и др. установили, что покрытие TiSiCN с содержанием Si 8,9 ат.% имеет мелкодисперсную композиционную микроструктуру, состоящую из наноразмерных кристаллитов TiCN, окруженных аморфной фазой Si_3N_4/SiC смесь. Значение микротвердости покрытий TiSiCN было значительно выше, чем у покрытий TiCN. Кроме того, средний коэффициент трения покрытий TiSiCN уменьшался с увеличением содержания Si. Однако, по сравнению с хорошо известными покрытиями, такими как TiN, покрытия TiSiCN далеко не полностью исследованы, особенно их трибологические свойства с алюминиевыми аналогами или в других условиях окружающей среды, например, в охлаждающей жидкости. Также было отмечено, что большинство исследованных покрытий, полученные

методом физического осаждения из газовой фазы имеют толщину всего несколько микрон.

В работе [21] покрытие TiN толщиной до 45 мкм и четвертичное покрытие TiSiCN толщиной до 17 мкм были нанесены на подложки из нержавеющей стали с использованием процесса плазменного магнетронного распыления, разновидности физического осаждения из паровой фазы. Однослойные и градиентные покрытия TiSiCN были нанесены методом плазмохимического осаждения из газовой фазы на подложку из стали H13, подвергнутую плазменному азотированию. Микроскопические наблюдения показали, что процесс плазменного азотирования увеличивает шероховатость поверхности подложки, тем самым увеличивая площадь поверхности раздела покрытие/подложка. Глубина диффузии азота была определена как 150 мкм на основании профиля твердости при поверхностной твердости 1350 HV. Для образца с прослойкой изменение состава на границе покрытия/подложка происходит постепенно. Оба покрытия TiSiCN имеют нанокompозитную структуру, состоящую из нанокристаллов TiCN размером 10–60 нм, встроенных в матрицу аморфного карбонитрида кремния. Оба покрытия TiSiCN демонстрируют одинаковую твердость и модуль упругости; тем не менее, на основании испытания на царапание нормальная сила для образования трещин и силы для отслоения увеличилась для градуированного покрытия на 117% и 40%, соответственно, по сравнению с однослойным покрытием. Повышение ударной вязкости и адгезии покрытия с прослойкой привело к уменьшению объема износа на 75%. Отсюда сделан вывод, что введение градиентной прослойки на границе раздела плазменно-азотированной подложки из стали H13 и покрытия TiSiCN значительно улучшает адгезию, ударную вязкость и износостойкость покрытия.

Покрытия TiSiCN были получены на подложке Ti_6Al_4V . Исследовано влияние содержания углерода на структуру и трибокоррозионные свойства. Покрытия состоят из нанокристаллитов TiN, TiC и Ti(C,N), аморфного Si_3N_4 , SiC и небольшого количества аморфного углерода. Покрытие (11,9 ат.% C) обладает максимальной твердостью 39,8 ГПа и наилучшей стойкостью к трибокоррозии, что обусловлено особой структурой нанокompозита, а также меньшим коэффициентом трения покрытия TiSiCN, связанным с эффектом графитизации при скольжении в атмосфере. Более того, результаты трибокоррозии показывают, что потеря объема покрытий TiSiCN объясняется износом и коррозией, а синергия между износом и коррозией является ключевым фактором в разрушении покрытия TiSiCN.

Плазмохимическое осаждение из газовой фазы является одним из наиболее распространенных способов обработки поверхности, который может не только повысить твердость материалов, но и повысить износостойкость и, таким образом, продлить

срок службы компонентов [6, 9]. Покрытие TiCN с полной растворимостью в твердом состоянии в кубической фазе B1, имеющее очевидные преимущества, в том числе низкий коэффициент трения и отличную коррозионную стойкость, но обладающее низкой пластичностью при комнатной температуре, что ограничивает его практическое применение [12]. При внедрении элемента Si в покрытие TiN с образованием особых зерен TiN нанометрового размера в матрице аморфной структуры Si₃N₄ — покрытие TiSiN, обладающее сверхтвердостью, улучшенными свойствами износостойкости и стойкости к окислению, однако обладающее высоким коэффициентом трения [10]. Четырехкомпонентная система TiSiCN, сочетающая в себе преимущества TiCN и TiSiN, обладает высокой твердостью, превосходной износостойкостью и самосмазываемостью, что ценится в условиях тяжелых нагрузок, высокой влажности или агрессивных средах [7], [23–25]. До сих пор многие сообщения были сосредоточены на исследовании влияния условий осаждения и химического состава нанокompозитного покрытия TiSiCN. Ма и др. установили влияние содержания C на механические и трибологические свойства покрытия TiSiCN с использованием технологии плазмохимического осаждения из газовой фазы и выявили механизм упрочнения покрытия [26]. Влияние источников углерода на микроструктуру и свойства покрытия TiSiCN было исследовано Эриксоном и соавт. [12]. Вэй и др. исследовали влияние содержания кремния путем изменения расхода газа TMC на микроструктуру и коррозионные свойства с использованием метода магнетронного распыления [9]. Существует несколько исследований трибокоррозионных свойств покрытия TiSiCN в морской воде. Кроме того, ускоряется разрушение покрытия в результате синергетического действия износа и коррозии, которая определялась как трибокоррозия, соответствующая реальной среде эксплуатации и оцениваемому механизму разрушения в агрессивной среде.

Покрытие TiSiCN сочетает в себе отличную износостойкость и коррозионную стойкость, что может показать отличные характеристики трибокоррозионной стойкости. В работе [9] покрытия TiSiCN получены на Ti₆Al₄V методом дугового ионного осаждения. Изучено влияние содержания углерода на структуру и поведение при трибокоррозии, и одновременно оценены трибокоррозионные механизмы деградации покрытия TiSiCN.

Исследовано влияние содержания углерода на структуру и трибокоррозионные свойства покрытий TiSiCN в искусственной морской воде. Результаты показали, что покрытие TiSiCN состоит из нанокристаллитов TiN, TiC и Ti(C,N), аморфного Si₃N₄, аморфного SiC и небольшого количества аморфного углерода. Также потери из-за износа несут основную ответственность за деградацию покрытия TiSiCN, а потери от коррозии составляют лишь небольшой процент потери объема. Кроме того, синергия между

износом и коррозией играет важную роль, так как коррозия ускоряется за счет удаления пассивирующего слоя в результате износа. С другой стороны, коррозия может ускорить истирание, когда в результате электрохимического растворения образуется хрупкий поверхностный слой, который впоследствии можно удалить абразивным истиранием.

В работе [27] состав покрытий составлял 43,3% Ti, 2,3% Si, 29% C и 25,3% N. В другом исследовании [25] покрытия TiSiCN с различным содержанием кремния образовывали нанокompозитные структуры, состоящие из кристаллов TiCN, внедренных в аморфную фазу Si₃N₄. Наибольшая твердость и адгезия к подложке были отмечены для покрытий, содержащих 3% Si; CVD-осаждение показало, что твердость и стойкость к окислению TiSiCN превосходит твердость и стойкость TiSiN-покрытий [26]; Абрахам и др. [10] использовали процесс химического осаждения из газовой фазы с плазменным усилением для получения покрытий TiSiCN с различными пропорциями кремния на подложках из нержавеющей стали; добавление Si в покрытие TiC(0,6)N(0,4) привело к уменьшению размера кристаллитов TiCN, окруженных аморфной фазой Si₃N₄/SiC, до 15–20 нм. TiSiCN имеет более низкий коэффициент трения и износа. Коэффициент трения и скорость изнашивания ниже, чем у покрытий TiN [28]. Аналогичным образом, авторы работы [29] исследовали влияние содержания углерода на структуру и фрикционно-коррозионные характеристики покрытий TiSiCN на подложках из титановых сплавов. По их данным, покрытие имело самый низкий коэффициент трения при температуре 22,2 °C, а самая высокая коррозионная стойкость наблюдалась при температуре 11,9 °C.

3. ПРИМЕНЕНИЕ РЕАКТИВНО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

В последние годы реактивно-плазменное напыление, сочетающее процессы напыления при атмосферном давлении и высокотемпературного синтеза, вызывает значительный интерес для получения толстых покрытий TiCN для промышленного применения благодаря высокой скорости осаждения и простоте процесса [30, 31].

Реактивно-плазменное напыление основано на использовании реактивной плазмы для взаимодействия с порошками исходного сырья. Реактивно-плазменное напыление является многообещающей технологией обработки материалов и производства покрытий, особенно для керамических покрытий, которые будут способствовать полупроводниковому оборудованию и т.д. благодаря своим выдающимся свойствам [1].

Реактивно-плазменное напыление имеет потенциал для получения твердых покрытий в простых условиях. Оно обладает многими преимуществами, такими как высокая скорость осаждения, низкая стоимость и хорошая адгезия к подложке.

Реактивно-плазменное напыление – это перспективный метод получения плотных композиционных покрытий с металлической или интерметаллической матрицей и мелкодисперсной керамической фазой [32, 33].

Метод реактивно-плазменного напыления применяется для адаптации составов покрытий, которые сложно или невозможно получить другими методами производства. Этот метод обеспечивает возможность контролировать процесс нанесения покрытий и позволяет создавать уникальные композиции с желаемыми свойствами, что делает его ценным инструментом в инженерии поверхностей и материалов. В процессе реактивно-плазменного напыления используется реакционная способность плазмы для стимулирования реакций азотирования в плазме при контролируемых условиях. При этом происходит реакция между исходным материалом (элементарным металлическим или неметаллическим порошком) и окружающими его активными азотирующими агентами (атомами, ионами, радикалами и т.д.) в плазме с образованием требуемого состава. Метод реактивно-плазменного напыления был разработан недавно, и его успешность ограничивается материалами и условиями эксплуатации напылительного оборудования. В данном конкретном исследовании рассматривается получение нитридной керамики методом реактивно-плазменного напыления. В последние годы этот процесс привлекает большое внимание благодаря своей простоте, высокой скорости осаждения и низкой стоимости; реактивно-плазменное напыление показало большой потенциал в производстве ряда нитридных керамик.

Преимуществом метода реактивно-плазменного напыления является достижение высокой твердости, получение улучшенного качества покрытия при одновременном получении высокой производительности. Керамические покрытия из нитридов титана, полученные методом реактивно-плазменного напыления, обладают высокими механическими свойствами, их часто используют для защиты подложек, что

увеличивает срок их службы, а также работают в агрессивных средах. Таким образом, преимуществами метода является достижение высокой твердости, получение улучшенного качества покрытия при одновременном получении высокой производительности.

Недостаток покрытий можно преодолеть, если покрытие TiN получают плазменным напылением, эффективность которого выше, чем у других способов, а толщина полученных покрытий больше, чем у других способов. Технология реактивно-плазменного напыления внедряется в последние годы как перспективный способ создания плотных композиционных покрытий с металлической или интерметаллидной матрицей и мелкодисперсными керамическими фазами [34–36].

Износостойкость покрытий, наносимых плазменным напылением, может быть повышена с помощью методов реактивно-плазменного напыления. Покрытия из нитрида титана, полученные методом реактивно-плазменного напыления, характеризуются значительной твердостью, более 1500 HV, без характерной хрупкости покрытий TiN, полученных методами физического осаждения из газовой фазы или химического осаждения из газовой фазы [33–36].

Один из видов оборудования для напыления типа LP-50B производится в Цзюцзяне, Китай, и его стандартная мощность составляет 50 кВт. Сборка распылителя осуществляется с использованием плазменного распылителя типа ВТ-Г3 и реактивной камеры собственной разработки и изготовления. Эскиз реактивно-плазменного напыления показан на рисунке 2 [34].

В последние десятилетия реактивному плазменному напылению в качестве поверхностной технологии уделялось больше внимания из-за его преимуществ, таких как простой рабочий процесс, низкая стоимость исходных порошков, синтез на месте и быстрое осаждение [30–36]. В таблице 2 приведены некоторые исследования свойств покрытий, полученных с помощью метода реактивно-плазменного напыления.

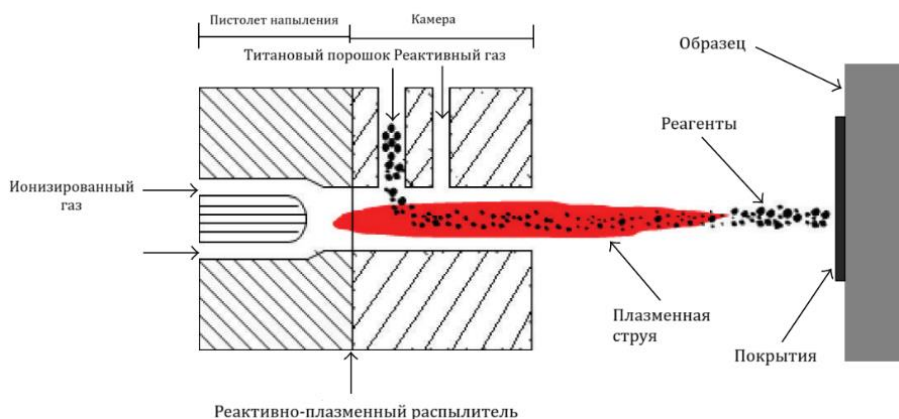


Рисунок 2. Эскиз реактивно-плазменного напыления [34]

**КРАТКИЙ ОБЗОР СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ TiSiCN
И МЕТОДА РЕАКТИВНО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

Таблица 2. Корреляционная таблица данных по получению карбидных покрытий с применением реактивно-плазменного напыления

Покрытие и параметры напыления	Изученные свойства	Основные результаты	Ссылка
Покрытия TiCN-Al ₂ O ₃ . Приготовлены методом распылительной грануляции со средним размером около 40 мкм (агломерированный порошок Ti-графита и порошок Al ₂ O ₃).	- фазовый состав и состав - микротвердость - окислительные и трибологические свойства - стойкость к окислению и износостойкость	Частицы Al ₂ O ₃ преимущественно распределяются по межпластинчатым зазорам для улучшения микроструктурной компактности, тогда как по мере увеличения частиц. Покрытие с 10 мас.% Al ₂ O ₃ обладает лучшей стойкостью к окислению и износостойкостью за счет плотной микроструктуры.	[37]
Покрытия Ti-6Al-4V. Распыление с помощью плазмы Ar/H ₂ . Расстояние распыления 75 мм, при 250 кПа в атмосфере азота.	- микроструктура - фазовый состав	Мелкое и крупное образования TiN в матрице Ti. Высокое давление усиливало азотирование порошка Ti-6Al-4V с содержанием азота, которое было тем выше, чем больше размер частиц. РЭМ показала мартенситную структуру сплава Ti-6Al-4V.	[38]
Покрытие TiN, подложка сталь 45. Перед нанесением покрытия TiN на поверхность образцов напыляли связующий слой самоплавкого сплава Ni-10 мас.% Al толщиной около 100 мкм для повышения прочности.	- микроструктура - фазовый состав - размер зерна - микротвердость - износостойкость	TiN обладает лучшей износостойкостью, чем быстрорежущая сталь M ₂ и покрытие из Al ₂ O ₃ в условиях отсутствия смазки. Твердость покрытия TiN – 1735,43 HV. Износостойкость покрытия лучше, чем у покрытия Al ₂ O ₃ и быстрорежущей стали M ₂ .	[39]
Покрытие TiCN, подложка сталь Q235. На подложку сначала напылялся сплав Ni-10 мас.%, Al в качестве связующего слоя для улучшения сцепления между покрытием и подложкой.	- состав - микроструктура - механические свойства - износостойкость	Получено покрытие TiC _{0,7} N _{0,3} толщиной > 300 мкм, состоящее из смеси наноструктуры и аморфных фаз TiC _{0,7} N _{0,3} , Ti ₃ O, CN _x и C. Фазы в основном образовывали столбчатые и дендритоподобные зерна. Покрытие TiC _{0,7} N _{0,3} обладает превосходной прочностью, ударной вязкостью и износостойкостью. Микротвердость составляет 1674±197 HV _{0,1} , вязкость разрушения – 3,76±0,31 МПа·м ^{1/2} .	[40]
Покрытия TiN состоят из наноразмерных зерен (диапазон от 70 до 90 нм). Подложка – сталь Q235 (Fe-0,14–0,22 мас.% C), размер 15×10×10 мм.	- микроструктура	Толщина покрытия TiN составляет более 300 мкм. Влияние на средний размер зерна также изучалось путем изменения мощности напыления и расстояния напыления. Снимки ПЭМ показывают, что покрытия TiN состоят из наноразмерных зерен (диапазон от 70 до 90 нм), и анализ уравнения Шеррера по среднему размеру зерен соответствует этому результату. Влияние на средний размер зерна также изучалось путем изменения мощности напыления и расстояния напыления.	[41]
Покрытия TiC–Ti ₅ Si ₃ –Ti ₃ SiC ₂ /Al напылялись реактивной плазмой из порошков 3Ti–Si–2C-xAl (x=0; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5).	- микроструктура - микротвердость - вязкость разрушения - трибологические характеристики	Твердость покрытий после добавления металла Al сначала увеличилась, а затем несколько снизилась, однако их вязкость разрушения улучшилась на ~23–51%, а потеря массы максимально снизилась с 0,6·10 ⁻³ г до 0,1·10 ⁻³ г.	[42]
TiCN с различным содержанием Cr были получены из смешанного порошка (Ti-графит + Cr) в атмосфере азота. Состав смеси: 40 мас.% сырого порошка, 40 мас.% деионизированной воды и 20 мас.% карбоксиметилцеллюлозы натрия.	- микроструктура - механические свойства	Композиционные покрытия TiCN-Cr показали меньшую пористость, чем покрытия TiCN, но пористость увеличивалась при избыточном добавлении Cr (30 мас.%). Покрытие TiCN–20 мас.% Cr показало наибольшую твердость (1309 HV _{0,2}) среди композиционных покрытий, несколько уступив матричному покрытию TiCN (1526 HV). Покрытие TiCN-Cr показали более высокие коэффициенты трения (0,4–0,6), чем матричные покрытия TiCN (0,35). Износостойкость композиционных покрытий TiCN-Cr была улучшена с меньшей потерей массы по сравнению с покрытием TiCN при испытательной нагрузке 400 Н.	[43]
Покрытие из нитрида титана (TiN) большой толщины (более 500 мкм) было напылено реактивной плазмой в азотсодержащей среде.	- микротвердость - вязкость - разрушения - твердость	Покрытие обладает высокой твердостью и ударной вязкостью. Средняя твердость покрытия 1200 HV на 100 г, а вязкость разрушения (KIC) составляет 4,51 МПа·м ^{1/2} .	[44]
TiN толщиной 300 мкм.	- коррозионное поведение	TiN-покрытия обладают хорошей коррозионной стойкостью в моделируемой морской воде. Твердость и вязкость разрушения покрытий составили 1674±197 HV _{0,1} и 3,76±0,31 МПа·м ^{1/2} соответственно.	[45]

В настоящее время реактивно-плазменное напыление используется для осаждения нитрида титана, в работе [44] получили покрытия из нитрида титана (TiN) толщиной более 500 мкм с помощью реактивно-плазменного напыления. Они исследовали микротвердость и вязкость разрушения и обнаружили, что покрытия обладают высокой твердостью (1200 HV₁₀₀ г) и вязкостью разрушения (KIC=4,51 МПа·м^{1/2}) Liu Zhe и др. [45] исследовали коррозионное поведение покрытий TiN, полученных плазмен-

ным напылением. Было установлено, что TiN-покрытия обладают хорошей коррозионной стойкостью в моделируемой морской воде, а их эксплуатационные характеристики значительно повышаются при уменьшении пористости. Было установлено, что покрытие толщиной 300 мкм можно получить в течение пяти минут. Твердость и вязкость разрушения покрытий составили 1674±197 HV_{0,1} и 3,76±0,31 МПа·м^{1/2} соответственно. Однако из-за предельной прочности связи между частицами осажденного расплава в ке-

раммических покрытиях, полученных методом реактивно-плазменного напыления, не удастся избежать некоторых дефектов (таких как поры, пустоты и микротрещины), которые ослабляют эксплуатационные характеристики покрытия [46].

Как сообщалось, многие металлические добавки (например, Co, Ni, Al) рассматриваются как эффективный способ улучшения механических и трибологических свойств керамических покрытий за счет повышения прочности связи [30–45]. В работе [36] порошки 3Ti-Si-2C-xAl ($x = 0; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5$) TiC-Ti₅Si₃-Ti₃SiC₂/Al композиционные покрытия были получены методом реактивно-плазменного напыления. Микроструктура, микротвердость, вязкость разрушения и трибологические свойства исследовались в зависимости от количества добавленного металла – Al. Результаты показали, что все покрытия, полученные методом реактивно-плазменного напыления, имеют пластинчатую структуру и состоят из трех доминирующих фаз (TiC, Ti₅Si₃ и Ti₃SiC₂) и небольшого количества остаточного Si.

Недавно Zhang и др. [43–46] получили покрытия TiCN-Cr и TiCN-Mo методом реактивно-плазменного напыления. Они обнаружили, что добавка Cr (или Mo) улучшает механические свойства покрытий и повышает их износостойкость. Аналогичным образом Cu – металлическая добавка с хорошей смачиваемостью, способная хорошо распределяться и покрывать поверхность других материалов, и низкой прочностью на сдвиг, была успешно добавлена в керамику на основе нитрида/карбида для улучшения ее механических и трибологических свойств [47, 48].

В связи с этим добавление Si к покрытиям TiCN, полученным методом реактивно-плазменного напыления, также может улучшить интегральные характеристики, такие как прочность, твердость, износостойкость и т. д. Однако исследований, посвященных получению покрытий TiSiCN методом реактивно-плазменного напыления мало. Кроме того, покрытия TiCN с металлическими добавками (например, Cr, Co, Ni, Al), полученные методом реактивно-плазменного напыления, которые по своим характеристикам отличаются от таких методов, как физическое осаждение из газовой фазы и химическое осаждение из газовой фазы, не оценивались с точки зрения трибокоррозионного поведения. До сих пор не до конца понятны закономерности формирования карбидных покрытий.

Выводы

В целом, на наш взгляд, износостойкие карбонитридные покрытия TiSiCN, полученные разными методами, могут увеличить фактический срок службы материалов для морских применений благодаря высокой твердости [6] и низкому коэффициенту трения [7], а также отличной износостойкости, стойкости к окислению и коррозии [8–11]. Сочетание этих свойств делает покрытия TiSiCN потенциальными кандидатами на получение защитных покрытий,

но все же требуются тщательные исследования. Кроме того, скрытые резервы сравнительно новой технологии, мощности напыления, скорости потока и расстояния напыления все еще не раскрыты.

По сравнению с физическим осаждением из газовой фазы и химическим осаждением из газовой фазы, реактивно-плазменное напыление обеспечивает простую обработку для быстрого получения более толстых покрытий (от десятков микрометров до сотен микрометров и даже до одного миллиметра) с хорошей адгезией покрытия к подложке. Поэтому реактивно-плазменное напыление чаще всего используется для получения высокоэффективных керамических покрытий [4, 5].

Как правило, процесс реактивно-плазменного напыления предполагает чрезвычайно быструю реакцию между различными впрыскиваемыми порошками (реакция твердое тело - твердое тело), а также между порошками и газами (реакция твердое тело - газ) при очень высокой температуре в плазменной струе [10].

Однако все предыдущие исследования по плазменному напылению TiN проводились в азотсодержащей камере напыления или с использованием плазменной струи газового туннельного типа; распыление, осуществляемое на воздухе, в прежних источниках не встречалось. Кроме того, лишь немногие исследования интересовались микроструктурой покрытия TiN, напыленного реактивной плазмой с помощью ПЭМ, а размер зерна ранее не анализировался.

Поэтому, авторы данной статьи считают, что путем разработки метода реактивно-плазменного напыления можно получить покрытия TiSiCN с улучшенными свойствами, фрикционно-коррозионным поведением в условиях высоких температур и жестких условий окружающей среды и это экономично выгодно. Также подбором оптимальных режимов и состава порошков можно улучшить трибологические и коррозионные характеристики покрытий TiSiCN и применить их для повышения срока службы деталей в автомобильной и нефтяной промышленности. Для осуществления этих работ будет использоваться установка для реактивно-плазменного напыления покрытий, расположенная в научно-производственной компании ТОО «PlasmaScience» (г. Усть-Каменогорск, Казахстан).

На основании анализа литературы можно утверждать, что дальнейшее развитие технологии реактивной плазмы связано с разработкой методов получения многокомпонентных нитридных и карбонитридных покрытий и изучением основных механизмов формирования этих покрытий.

Благодарности

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19175967).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Dong Yanchun, Yan Dianran, He Jining, Zhang Jianxin, Xiao Lisong, and Li Xiangzhi. Studies on Nanocrystalline TiN Coatings Prepared by Reactive Plasma Spraying. *Nanomechanics and Nanostructured Multifunctional Materials: Experiments, Theories, and Simulations.* – Vol. 2008, – Article ID 690951. <https://doi.org/10.1155/2008/690951>
- Y. Cheng, T. Browne, B. Heckerman, E. Meletis, Mechanical and tribological properties of nanocomposite TiSiN coatings, *Surf. Coat. Technol.* 204 (2010) 2123–2129.
- D. Ma, S. Ma, K. Xu, Influence of Si content on Nano-structured Ti–Si–N films coated by pulsed-dc plasma enhanced CVD, *Surf. Coat. Technol.* 184 (2004) 182–187.
- F. Movassagh-Alanagh, A. Abdollah-zadeh, M. Aliofkhaezai, M. Abedi, Improving the wear and corrosion resistance of Ti–6Al–4V alloy by deposition of TiSiN nanocomposite coating with pulsed-DC PACVD, *Wear* 390 (2017) 93–103.
- S. Abraham, E.Y. Choi, N. Kang, K.H. Kim, Microstructure and mechanical properties of Ti-Si-CN films synthesized by plasma-enhanced chemical vapor deposition, *Surf. Coat. Technol.* 202 (2007) 915–919.
- I. Endler, M. Höhn, J. Schmidt, S. Scholz, M. Herrmann, M. Knaut, Ternary and quaternary TiSiN and TiSiCN nanocomposite coatings obtained by chemical vapor deposition, *Surf. Coat. Technol.* 215 (2013) 133–140.
- Y. Guo, S. Ma, K. Xu, T. Bell, X. Li, H. Dong, Transmission electron microscopy microstructural characterization of Ti–Si–C–N coatings, *J. Mater. Res.* 23 (2011) 198–203. <https://doi.org/10.1557/jmr.2008.0019>
- S.L. Ma, D.Y. Ma, Y. Guo, B. Xu, G.Z. Wu, K.W. Xu, P.K. Chu, Synthesis and characterization of super hard, self-lubricating Ti–Si–C–N nanocomposite coatings, *Acta Mater.* 55 (2007) 6350–6355. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.07.046>
- Y. Wang, J. Li, C. Dang, Y. Wang, Y. Zhu, Influence of carbon contents on the structure and tribocorrosion properties of TiSiCN coatings on Ti6Al4V, *Tribol. Int.* 109 (2017) 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.01.002>
- Y. Wang, J. Li, C. Dang, Y. Wang, Y. Zhu, Influence of bias voltage on structure and tribocorrosion properties of TiSiCN coating in artificial seawater, *Mater. Char.* 127 (2017) 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.03.012>
- J. Li, Y. Wang, Y. Yao, Y. Wang, L. Wang, Structure and tribological properties of TiSiCN coating on Ti6Al4V by arc ion plating, *Thin Solid Films* 644 (2017) 115–119. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.09.053>
- Yang, Sheng-Ming, Chang, Yin-Yu, Wang, Da-Yung, Lin, Dong-Yi and Wu, WeiTe. (2007). *Journal of Alloys and Compounds*, 440, 375–379
- L. Johnson, L. Rogström, M. Johansson, M. Odén, L. Hultman, Microstructure evolution and age hardening in (Ti, Si)(C, N) thin films deposited by cathodic arc evaporation, *Thin Solid Films* 519 (2010) 1397–1403. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.08.150>
- Matlab N Mirzayev, Anca C Parau, Lyubomir Slavov, Mihaela Dinu, Dimitar Neov, Zdravka Slavkova, Evgeni P. Popov, Maria Belova, Kanan Hasanov, Fuad A. Aliyev, Alina Vladescu Dragomir. TiSiCN as Coatings Resistant to Corrosion and Neutron Activation. *Materials* (Basel). 2023 Feb 23;16(5):1835. <https://doi.org/10.3390/ma16051835>
- Mohammad Abedi, Amir Abdollah-zadeh, Antonello Vicenzo, Massimiliano Bestetti, Farid Movassagh-Alanagh, Elyad Damerchi, Wei Li. A comparative study of the mechanical and tribological properties of PECVD single layer and compositionally graded TiSiCN coatings. *Ceramics International* Volume 45, Issue 17, Part A, 1 December 2019, P. 21200–21207.
- Li, W., Liu, P., Xue, Z. et al. Microstructures, mechanical behavior and strengthening mechanism of TiSiCN nanocomposite films. *Sci. Rep.* 7, 2140 (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02186-1>
- I. Endler, M. Höhn, J. Schmidt, S. Scholz, M. Herrmann, M. Knaut, Ternary and quaternary TiSiN and TiSiCN nanocomposite coatings obtained by chemical vapor deposition, *Surf. Coat. Technol.* 215 (2013) 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.067>
- S. Abraham, E.Y. Choi, N. Kang, K.H. Kim, Microstructure and mechanical properties of Ti-Si-CN films synthesized by plasma-enhanced chemical vapor deposition, *Surf. Coat. Technol.* 202 (2007) 915–919. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.05.073>
- H. Xu, X. Nie, R. Wei, Tribological behavior of a TiSiCN coating tested in air and coolant, *Surf. Coat. Technol.* 201 (2006) 4236–4241. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.08.066>
- D. Yanchun, Y. Dianran, H. Jining, Z. Jianxin, X. Lisong, L. Xiangzhi, Studies on nanocrystalline TiN coatings prepared by Reactive Plasma Spraying, *J. Nanomater.* (2008) Article ID 690951. <https://doi.org/10.1155/2008/690951>
- Feng W, Yan D, He J et al. Microhardness and toughness of the TiN coating prepared by reactive plasma spraying. *Appl Surf Sci.* 2005, 243(1–4):204–213.
- H. Xu, X. Nie, R. Wei, Tribological behavior of a TiSiCN coating tested in air and coolant. *Surface and Coatings Technology* Volume 201, Issue 7, 20 December 2006, P. 4236–4241.
- S.L. Ma, D.Y. Ma, Y. Guo, B. Xu, G.Z. Wu, K.W. Xu, P.K. Chu, Synthesis and characterization of super hard, self-lubricating Ti–Si–C–N nanocomposite coatings, *Acta Mater.* 55 (2007) 6350–6355. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.07.046>
- L. Johnson, L. Rogström, M. Johansson, M. Odén, L. Hultman, Microstructure evolution and age hardening in (Ti, Si)(C, N) thin films deposited by cathodic arc evaporation, *Thin Solid Films* 519 (2010) 1397–1403. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.08.150>
- E. Thangavel, S. Lee, K.-S. Nam, J.-K. Kim, D.-G. Kim, Synthesis and characterization of Ti–Si–C–N nanocomposite coatings prepared by a filtered vacuum arc method, *Appl. Surf. Sci.* 265 (2013) 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.10.107>
- I. Endler, M. Höhn, J. Schmidt, S. Scholz, M. Herrmann, M. Knaut, Ternary and quaternary TiSiN and TiSiCN nanocomposite coatings obtained by chemical vapor deposition, *Surf. Coat. Technol.* 215 (2013) 133–140, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.10.067>
- Y. Tanno, A. Azushima, Effect of counter materials on coefficients of friction of TiN coatings with preferred grain orientations, *Wear* 266 (2009) 1178–1184.
- R.A. Rosu, V.A. Serban, A.I. Bucur, et al., Deposition of titanium nitride and hydroxyapatite-based biocompatible

- composite by reactive plasma spraying, Appl. Surf. Sci. 258 (8) (2012) 3871–3876.
29. Y.F. Qin, L.Y. Zhu, J.N. He, et al., Microstructure and tribological properties of TiCN-Al₂O₃ composite coatings fabricated by reactive plasma spraying, Vacuum 147 (2018) 149–157.
30. P.V. Ananthapadmanabhan, P.R. Taylor, Titanium carbide–iron composite coatings by reactive plasma spraying of ilmenite, J. Alloy Compd. 287 (1999) 121–125.
31. D. Yanchun, Y. Dianran, H. Jining, Z. Jianxin, X. Lisong, L. Xiangzhi, Studies on nanocrystalline TiN coatings prepared by Reactive Plasma Spraying, J. Nanomater. (2008) Article ID 690951. <https://doi.org/10.1155/2008/690951>
32. Feng W, Yan D, He J et al. Microhardness and toughness of the TiN coating prepared by reactive plasma spraying. Appl Surf Sci, 2005, 243(1–4):204–213.
33. Liu Z, Yan D, Dong Y et al. The effect of modified epoxy sealing on the electrochemical corrosion behavior of reactive plasma-sprayed TiN coatings. Corros Sci, 2013, 75(7):220–227.
34. C. Li, F. Zhang, J. He and F. Yin, Preparation and Properties of Reactive Plasma Sprayed TiC-Ti₅Si₃-Ti₃SiC₂/Al Coatings from Ti-Si-C-Al Mixed Powders, Mater. Chem. Phys., 2021, 269, P. 124772.
35. F. Zhang, J. He, K. Chen, et al., Microstructure evolution and mechanical properties of TiCN-Cr nano/micro composite coatings prepared by reactive plasma spraying, Appl. Surf. Sci. 427 (2018) 905–914.
36. F. Zhang, C. Li, S. Yan, et al., Microstructure and tribological properties of plasma sprayed TiCN-Mo based composite coatings, Appl. Surf. Sci. 464 (2019) 88–98.
37. Y.F. Qin, L.Y. Zhu, J.N. He, et al., Microstructure and tribological properties of TiCN-Al₂O₃ composite coatings fabricated by reactive plasma spraying, Vacuum 147 (2018) 149–157.
38. Plasma-sprayed Ti-6Al-4V coatings in a reactive nitrogen atmosphere up to 250 kPa V. Guipont, R. Molins, M. Jeandin, F. Evry, G. Barbezat, Ch. Wholen.
39. Dong Yanchun, Yan Dianran, He Jining, Zhang Jianxin, Xiao Lisong, and Li Xiangzhi. Studies on Nanocrystalline TiN Coatings Prepared by Reactive Plasma Spraying. January 2008 Journal of Nanomaterials 2008(1). <https://doi.org/10.1155/2008/690951>
40. P. Mi, J. He, Yu. Qin, et al., Nanostructured Reactive Plasma Spraying of TiCN Coatings, Surf. Coat. Technol. 309 (2017) 1–5.
41. L. Xiao, D. Yang, J. He et al., Nanostructured TiN Coating Produced by Atmospheric Reactive Plasma Spraying, Appl. Surf. scientific 253 (18) (2007) 7535–7539.
42. C. Li, F. Zhang, J. He, F. Yin, Preparation and properties of reactive plasma spraying of TiC-Ti₅Si₃-Ti₃SiC₂/Al coatings from mixed Ti-Si-C-Al powders, Material. chem. Phys., 2021, 269, P. 124772.
43. Zhang F, He J, Chen K, et al., Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Reactive Plasma Sprayed TiCN-Cr Nano/Microcomposite Coatings, Appl. Surf. scientific 427 (2018) 905–914.
44. L. Xiao, D. Yan, J. He, et al., Nanostructured TiN coating prepared by reactive plasma spraying in atmosphere, Appl. Surf. Sci. 253 (18) (2007) 7535–7539.
45. J. Liu, C. Liang, The improvement of toughness and tribological properties of nio- bium nitride film by addition of copper, Vacuum 143 (2017) 59–62.
46. K. Ma, X. Cao, X. Xue, Mechanical properties, microstructure and grain orientation of hot pressed WB2 ceramics with Co as a sintering additive, Ceram. Int. 45 (12) (2019) 14718–14727.
47. Rakhadilov B.K., Buitkenov D.B., Sagdoldina Zh., Seitov B., Kurbanbekov Sh., Adilkhanova M. Structural features and tribological properties of detonation gun sprayed Ti-Si-C coating. Coatings, 2021, 11(2), 1–13, 141.
48. Rakhadilov B.K., Buitkenov D.B., Adilkhanova M., Sagdoldina Zh.B., Kurbanbekov Sh. K. Influence of pulse plasma treatment on the phase composition and microhardness of detonation coatings based on Ti-Si-C // Bulletin of Karaganda University. – 2021. – No. 2 (102).

TiSiCN ЖАБЫНДАРЫН АЛУ ӘДІСТЕРІ ЖӘНЕ РЕАКТИВТІ ПЛАЗМАЛЫҚ БҮРКУ ӘДІСТЕРІНЕ ҚЫСҚАША ШОЛУ

Д. С. Баймолданава^{1,2*}, Б. К. Рахадиллов^{1,2}, А. Кенесбеков¹, А. Кусайнов^{1,2}, А. Маулит^{1,3}

¹ Plasma Science LLP, Өскемен қаласы, Қазақстан

² Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қаласы, Қазақстан

³ Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Қазақстан

*Байланыс үшін E-mail: lyazbs_82@mail.ru

Қазіргі заманауи материалтану алдында көп функционалды жабындары бар жаңа материалдарды әзірлеу міндеті тұр. Мұндай жабындары бар материалдар технологияның әртүрлі салаларында кеңінен қолданылады: құрылыс және энергетика, микроэлектроника, авиация және т.б. Көп функциялы қорғаныс жабындарын қолдану технологиясының пайда болуы мен дамуының негізгі себебі әртүрлі машина механизмдерінің бөлшектері мен тораптарының беріктігін арттыруға ұмтылу болып табылады. Өтпелі металдардың нитридтері мен карбонитридтеріне негізделген тозуға төзімді қатты жабындар соғу және экструзиялық қалыптардың және жоғары жылдамдықты өңдеу құралдарының қызмет ету мерзімін ұзарту үшін кеңінен қолданылады. Соңғы екі онжылдықта бұл жабындарды кеңінен қолдану олардың қасиеттерін одан әрі жақсарту мақсатында жаңа процестер мен материалдардың дамуын ынталандырды және қолдады. Осы жабындардың ішінде TiSiN және TiSiCN сияқты жабындардың жоғары қаттылығы, жоғары тотығуға төзімділігі және жоғары термиялық тұрақтылығы жағынан қойылған талаптарға сай трибологиялық қолдану үшін болашағы зор материал болып

табылады. Сонымен қатар, TiSiCN жабыны тозуға және коррозияға жоғары төзімділігіне, сондай-ақ жоғары қаттылыққа және төмен үйкеліс коэффициентіне байланысты теңіз кеңістігінде қолданылатын болашағы бар материал болып табылады. Бұл қасиеттер комбинациясы TiSiCN болатын жабындарды автомобиль және мұнай өнеркәсібіндегі қорғаныс қабаттары үшін әлеуетті үміткерлер ете алады.

Мақалада алынған жабындардың қасиеттерін бақылау үшін әртүрлі тұндыру әдістерін қолдана отырып, TiSiCN жабындарын алу мүмкіндіктері және реактивті плазмалық бүрку әдісінің ерекшеліктері қысқаша шолу қарастырылды. Жұмыста қазіргі уақытта қолданылатын карбонитридті жабындарды алудың ең кең таралған әдістері мен технологиялары сипатталған. Өнеркәсіптік жабындарға арналған маңызды инновацияларды ескере отырып, плазмалық бүріккішпен жабу технологиялары саласындағы соңғы әзірлемелер мен ағымдағы үрдістер қарастырылады. Физика немесе химия бойынша іргелі және қолданбалы зерттеулер нәтижесінде алынған жаңа тұжырымдар негізделген. Мақалада тозуға төзімді TiSiCN жабындарын алу сипаттамаларына және тозуға төзімді жабындарды алу үшін реактивті плазмалық бүркуді қолдану ерекшеліктеріне салыстырмалы шолу жасалған. Әдебиеттерді талдау негізінде, реактивті плазмалық технологияның одан әрі дамуы әлемдік ғылымның тенденцияларына сәйкес келетін коррозиялық және трибологиялық жоғары сипаттамалары бар композиттік жабындардың түзілуінің жаңа ресурс үнемдейтін әдісін әзірлеумен байланысты болады деп тұжырым жасауға болады.

Түйін сөздер: плазмалық бүрку, TiSiCN, карбонитридті жабындар, тозу, коррозия, жағу үрдістері, реактивті плазмалық бүрку.

BRIEF OVERVIEW OF METHODS FOR PRODUCING TiSiCN COATINGS AND THE METHOD OF REACTIVE PLASMA SPRAYING

L. S. Baimoldanova^{1,2*}, B. K. Rakhadilov^{1,2}, A. Kenesbekov¹, A. Kussainov^{1,2}, A. Maulit^{1,3}

¹ Plasma Science LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

² Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

³ Shakarim University of Semey, Kazakhstan

*E-mail for contacts: lyazbs_82@mail.ru

Modern materials science sets itself the task of developing new materials with multifunctional coatings. Materials with such coatings are widely used in various fields of technology: construction and energy, microelectronics, aviation and others. The main reason for the emergence and development of technology for applying multifunctional protective coatings is the desire to increase the durability of parts and assemblies of various machine mechanisms. Wear-resistant hard coatings based on transition metal nitrides and carbonitrides are widely used to extend the life of forging and extrusion dies and high-speed machining tools. Over the past two decades, the widespread use of these coatings has stimulated and supported the development of new processes and materials in an attempt to further improve their properties. Among these coatings, the higher hardness, excellent oxidation resistance and high thermal stability of coatings such as TiSiN and TiSiCN make them the most promising candidates for demanding tribological applications. In addition, TiSiCN coating is a promising material used in marine environments due to its excellent anti-wear and corrosion resistance, as well as high hardness and low friction coefficient. These combinations of properties make TiSiCN coatings potential candidates for protective layers in the automotive and petroleum industries.

The article briefly examines the possibilities of producing TiSiCN coatings using different deposition methods to control the properties of the resulting films and the features of the reactive plasma spraying method. The work describes the most common methods and technologies for producing carbonitride coatings currently used. The latest developments and current trends in the field of plasma spray coating technologies are reviewed, taking into account important innovations for industrial coatings. New conclusions that were obtained as a result of fundamental and applied research in physics or chemistry are based on them. The article provides a comparative review of the characteristics of obtaining wear-resistant TiSiCN coatings and the features of using reactive plasma spraying to obtain wear-resistant coatings. Based on an analysis of the literature, it can be argued that the further development of reactive plasma technology is associated with the development of a new resource-saving method for the formation of composite coatings with increased corrosion and tribological characteristics, which corresponds to the development trends of world science.

Keywords: plasma spraying, TiSiCN, carbonitride coatings, wear, corrosion, coating processes, reactive plasma spraying.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-24-33>

УДК 538.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ И УПРУГИХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛА $Y_3Al_5O_{12}$

Г. М. Баубекова^{1*}, А. Ахмедов¹, Ф. У. Абуова¹, Р. Н. Асылбаев²,
А. У. Абуова¹, Г. П. Турсумбаева¹, Г. Д. Кабдрахимова¹

¹ Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

² Павлодарский педагогический университет имени Э. Марғұлан, Павлодар, Казахстан

*E-mail для контактов: guldar_87@mail.ru

В данной научной работе было проведено комплексное исследование иттрий-алюминиевого граната с применением методов компьютерного моделирования. Проанализированы упругие свойства, а также детально исследованы кристаллические и зонные структуры. При помощи современных вычислительных методов проведено детальное изучение механических параметров материала, таких как модуль упругости и коэффициент Пуассона. Методы виртуального моделирования позволяют детально изучить механические характеристики материала. Основное внимание уделяется созданию и верификации компьютерных моделей, точно отражающих упругие свойства кристалла. Были проведены сравнения значений параметров, получаемых при использовании различных гибридных функционалов, с экспериментальными данными. Виртуальные модели позволили не только детально изучить механические характеристики материала, но и предоставили результаты, существенно близкие к реальным экспериментальным данным. Сравнения проводились по следующим параметрам: параметры ячейки, энергия запрещенной зоны, эффективные заряды атомов кристалла, уравнения состояния и упругие свойства. Так же определены уровни погрешности относительно экспериментальных данных. Представлены результаты анализа кристаллической структуры иттрий-алюминиевого граната, полученные с применением различных обменно-корреляционных гибридных функционалов, таких как B3PW, B3LYP, HSE06, PBE. Этот аспект исследования включает в себя анализ параметров кристаллической решетки, распределение атомов в кристалле и зонную структуру, что важно для полного понимания свойств материала.

Ключевые слова: иттрий-алюминиевый гранат, теория функционала плотности, запрещенная зона, элементарная ячейка, упругие свойства, моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы значительно возрос интерес к исследованию и применению монокристаллов $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG) благодаря их уникальным физическим и химическим свойствам. Эти материалы находят широкое применение в различных областях, включая оптоэлектронику, лазерные системы и твердотельную электронику, благодаря их высокой термической стабильности, механической прочности и оптическим характеристикам. Важным аспектом развития технологий, основанных на YAG, является глубокое понимание их электронной, кристаллической структуры и механических свойств, что также возможно благодаря применению современных квантово-химических методов.

Иттрий-алюминиевый гранат ($Y_3Al_5O_{12}$) – синтетический кристаллический материал, имеющий кубическую кристаллическую решетку 230-й кристаллографической группы, обозначаемую символом Ia3d. Благодаря широкой оптической прозрачности [1], низкому внутреннему напряжению, высокой твердости и термостойкости, YAG используется в УФ и ИК оптике. Кристалл YAG, аналогично гранату и сапфиру, не имеет применения в качестве лазерной среды в чистом виде. Тем не менее, после легирования соответствующими примесями, YAG часто используется в качестве основного материала в различных твердотельных лазерах [2].

Монокристаллы YAG активно исследуются с применением различных теоретических подходов для моделирования и анализа их свойств на атомном уровне [3–5]. Среди наиболее перспективных и широко применяемых методов выделяются квантово-химические расчеты, позволяющие с высокой точностью предсказывать электронную структуру и характеристики взаимодействия между атомами в кристалле. В частности, в данной работе акцентируется внимание на использовании различных функционалов плотности, таких как B3PW, B3LYP, HSE06 и PBE, которые демонстрируют свою эффективность в моделировании комплексных систем, подобных YAG.

Цель данной статьи состоит в том, чтобы оценить влияние применения разнообразных функционалов на точность предсказаний электронных, кристаллических структур и механических свойств монокристаллов $Y_3Al_5O_{12}$. Исследование стремится не только углубить понимание фундаментальных свойств YAG, но и обеспечить ценные указания для дальнейшего развития материаловедения и технологий, основанных на этих материалах. Приводимые в работе результаты могут стать основой для оптимизации процессов синтеза и обработки YAG, способствуя улучшению их характеристик для конкретных приложений.

1. МЕТОДЫ

Все расчеты были проведены посредством компьютерного моделирования в программе CRYSTAL17. В этой работе был использован расчет типа ограниченной закрытой оболочки (RCS) с гамильтонианами Кона-Шэма. Расчеты проводились при помощи следующих гибридных функционалов: обменно-корреляционный функционал Пердью-Вонга V3PW; обменно-корреляционный функционал Ли-Янга-Перра V3LYP; обменно-корреляционный функционал Хэйда-Скусерия-Эрзенхофа, основанный на обменно-корреляционном функционале Пердью-Бюрка-Эрзенхофа разработанный для твердых тел (PBE); обменно-корреляционный функционал Хэйда-Скусерия-Эрзенхофа (HSE06), основанный на обменно-корреляционном функционале Пердью-Бюрка-Эрзенхофа. Отличие от функционала Пердью-Бюрка-Эрзенхофа в том, что по отношению к этому функционалу применили экранированный кулоновский потенциал только к обменному взаимодействию, чтобы экранировать дальнюю часть обмена Хартри-Фока. В качестве базисов для кристалла были выбраны согласованные гауссовы базисные наборы двойной и тройной зета-валентности с поляризационным качеством пятого периода для твердотельных расчетов Лауна-Оливейра-Брэдоу и Пейтингера-Оливейра-Брэдоу [6, 7]. В первых двух функционалах процент обмена Фока в гибридном обмене составляет 20%, в то время как в последних двух 25%. Для расчета кулоновских и обменных интегралов выбраны точности (допуски) 10^{-6} , 10^{-6} , 10^{-6} , 10^{-6} , 10^{-12} . Для расчетов по данному кристаллу были выбраны k-точки 2×2 .

Для большей точности проводились полные оптимизации систем, что позволило нам получить низкую погрешность. В следующем разделе мы провели анализ кристаллической структуры и зависимость параметров кристалла от используемых гибридных методов. В третьем и четвертом разделе были приведены результаты исследования уравнений состояний и упругих свойств, соответственно.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Кристаллическая структура

Объектом исследования является кубический синтетический кристалл иттрий-алюминиевого граната ($Y_3Al_5O_{12}$), кристаллографическая группа кристалла которого Ia3d, под номером 230. Параметры кристаллической решетки: $a = b = c = 12,008 \text{ \AA}$.

Элементарная ячейка иттрий-алюминиевого граната содержит 8 атомов алюминия, расположенных в октаэдрических позициях, и 12 атомов алюминия, расположенных в тетраэдрической позиции, а также 12 атомов иттрия и 48 атомов кислорода. Y занимает додекаэдрические позиции, тогда как для ионов Al имеются две разные позиции – октаэдрическая и тетраэдрическая. Атомы O расположены в общих положениях.

Функционал V3PW имеет наименьшую погрешность, энергии запрещенной зоны, относительно экспериментальных данных. Что касается параметров ячейки, то погрешность у этого функционала равна 0,27%. Параметры ячейки кристалла, рассчитанные функционалом HSE06, имеют наименьшую погрешность 0,1%. На рисунке 1 приведены графики плотности состояний кристалла при разных функционалах.

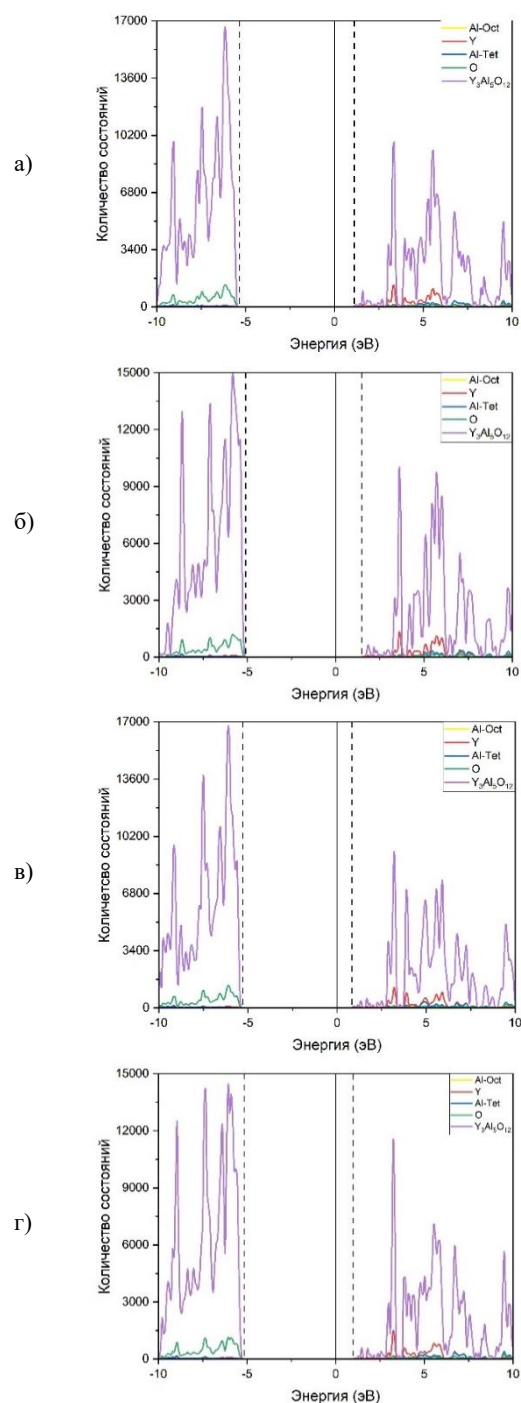


Рисунок 1. Плотность состояний кристалла YAG, рассчитанная с применением функционалов: V3PW (а), V3LYP (б), PBE (в) и HSE06 (г)

Таблица 1. Сравнение геометрических и электронных свойств с применением различных функционалов

Параметры		Полученные данные				Экспериментальные и теоретические данные
		Функционалы				
		VЗPW	VЗLYP	PBE	HSE06	
Параметры ячейки	a, Å (погрешность)	12,04 (0,27%)	12,1 (0,76%)	11,94 (0,57%)	12,02 (0,1%)	12,008 [8]
Энергия запрещенной зоны, эВ (погрешность)		6,6 (1,54%)	6,63 (2%)	6,24 (4%)	6,33 (2,61%)	6,5 [8]
Эффективные заряды Q(e) атомов	Al _{oct}	1,87	1,916	1,858	1,879	1,843 [9]
	Al _{tet}	1,99	2,014	1,975	1,996	2,036 [9]
	Y	1,806	1,856	1,781	1,835	2,033 [9]
	O	6,739	6,713	6,751	6,729	6,676 [9]

Таблица 2. Значения объемного модуля при различных функционалах

Функционал	Уравнение состояния	Объем, Å ³	Энергия, эВ	Объемный модуль, ГПа (погрешность)	Объемный модуль, экспериментальные данные, ГПа [9]
HSE06	Мурнаган	868,2679	-242779,81	187,19 (1,07%)	185,2
	Берч-Мурнаган	868,2580	-242779,811	187,61 (0,73%)	189
	4-й полином	868,2373	-242779,812	187,86 (17,82%)	228,6
PBE	Мурнаган	851,6936	-242362,177	195,94 (5,8%)	185,2
	Берч-Мурнаган	851,6834	-242362,178	196,37(3,9%)	189
	4-й полином	851,6674	-242362,178	196,65 (13,98%)	228,6
VЗPW	Мурнаган	873,1539	-242896,519	183,59 (0,87%)	185,2
	Берч-Мурнаган	873,1425	-242896,52	183,99 (2,65%)	189
	4-й полином	873,1288	-242896,52	184,24 (19,4%)	228,6
VЗLYP	Мурнаган	887,8182	-242878,0104	178,56 (3,58%)	185,2
	Берч-Мурнаган	887,8064	-242878,0109	178,95 (5,32%)	189
	4-й полином	887,7886	-242878,0112	179,10 (21,65%)	228,6

Как можно заметить из этих графиков и таблицы 1, значение ширины запрещенной зоны, наиболее близкое к экспериментальным данным, имеет функционал VЗPW. При моделировании небольшим изменениям подверглось значение параметра решетки. Наиболее близким, к экспериментальным данным, результат показал функционал HSE06 с погрешностью в 0,1%. Можно отметить, что все четыре гибридных функционала в сочетании с базисными наборами, предложенные в [6, 7], показывают вполне точные результаты.

Уравнение состояния

Был проведен анализ уравнений состояний для каждого гибридного функционала. Сравнивались полученные результаты моделирования с экспериментальными данными. Сравнения проводились по трём методам расчета уравнения состояния. Результаты приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, при расчете с функционалом HSE06 во всех трёх методах расчета объем был примерно равен 868 Å³. Расчет объемного модуля по методу Берча-Мурнагана дает наиболее точные результаты (187,61 ГПа), погрешность практически равна нулю. Это позволяет нам лучше понять меха-

нические свойства кристалла при изменении различных условий, такие как давление, объем и температура.

Расчеты также проводились с помощью функционала PBE, который является разновидностью функционала HSE06 для твердых тел. Несмотря на то, что данный функционал предназначен именно для твердых материалов, он показывает не лучшие результаты относительно HSE06. Самая наименьшая погрешность равна 3,9%. Но при этом, расчет уравнения полинома четвертого порядка самый точный из всех используемых гибридных функционалов, погрешность равна 13,98%.

VЗPW включает параметры, предложенные Бекке, Ли, Янгом и Парра, что делает его гибридным и обеспечивает баланс между точным описанием обмена и корреляции. Учет корреляционных эффектов позволяет получать более реалистичные предсказания упругих свойств материала. Этот функционал показывает лучший результат при расчете уравнения состояния методом Мурнагана. Уравнение состояния Мурнагана является одним из простых модельных уравнений, позволяющих описать объемные свойства твердых тел при высоких давлениях.

Функционал B3LYP показал наименее точные результаты относительно всех трех методов уравнения состояния среди всех функционалов. B3LYP является гибридным функционалом, что означает, что он комбинирует локальное приближение с точными методами. Он широко используется для расчетов молекул и систем с переходными металлами. Несмотря на то, что иттрий (Y) принадлежит к блоку d-элементов в периодической системе, он расположен в самом начале блока и его электронная конфигурация не включает неполную d-подоболочку и он не является переходным металлом. Это могло сказаться на точности расчетов.

Сравнив результаты во всех четырех функционалах, было определено, что объемный модуль, рассчитанный функционалом HSE06, имеет наименьшую погрешность. Этот функционал был разработан для более точного описания электронной корреляции и обмена в материалах, особенно в твердых телах и полупроводниках, что подтверждается в этой главе. Такие точные результаты помогают лучше понять упругие свойства материала, в данном случае, его объемное сжатие. Это важно для оптимизации использования материала в различных условиях. Уравнение состояния определяет зависимость между различными параметрами материала, такими как давление, объем, температура, их изменения и другие свойства

Упругие свойства $Y_3Al_5O_{12}$

Также были изучены упругие свойства кристалла YAG с использованием вышеупомянутых гибридных функционалов.

Таблица 3. Упругие тензорные константы разных функционалов

$C_{ij}, 10^9 \text{ Па (погрешность)}$				
HSE06	PBE	B3PW	B3LYP	Экспериментальные данные [10]
$C_{11}=338,5$ (1,6%)	$C_{11}=352,7$ (5,85%)	$C_{11}=332,4$ (0,24%)	$C_{11}=324,6$ (2,58%)	$C_{11}=333,2$
$C_{12}=112,6$ (1,72%)	$C_{12}=118,5$ (7%)	$C_{12}=109,8$ (0,8%)	$C_{12}=105,8$ (4,4%)	$C_{12}=110,7$
$C_{44}=115,6$ (0,5%)	$C_{44}=117,1$ (1,8%)	$C_{44}=114,4$ (0,5%)	$C_{44}=114,8$ (0,17%)	$C_{44}=115$

Из таблицы 3 видно, что все четыре функционала показывают вполне неплохие результаты, максимальная погрешность равна 5,85%. Было определено, что упругие тензорные константы, рассчитанные функционалом B3PW, имеют наименьшую погрешность.

В таблице 4 приведены модули упругости для разных функционалов.

Таблица 4. Модули упругости с применением разных функционалов

	HSE06	PBE	B3PW	B3LYP	Экспериментальные данные [11]
$K_V, 10^9 \text{ Па}$	187,89	196,56	184,01	178,75	187
$K_R, 10^9 \text{ Па}$	187,89	196,56	184,01	178,75	
$K_H, 10^9 \text{ Па}$	187,89	196,56	184,01	178,75	
$E_V, 10^9 \text{ Па}$	285,61	293,01	281,72	279,22	280
$E_R, 10^9 \text{ Па}$	285,58	293,01	281,68	279,09	
$E_H, 10^9 \text{ Па}$	285,6	293,01	281,7	279,15	
$G_V, 10^9 \text{ Па}$	114,55	117,06	113,15	112,62	112
$G_R, 10^9 \text{ Па}$	114,54	117,06	113,13	112,56	
$G_H, 10^9 \text{ Па}$	114,54	117,06	113,14	112,59	
ν_V	0,24666	0,25155	0,24484	0,23965	0,25
ν_R	0,24668	0,25155	0,24488	0,23977	
ν_H	0,24667	0,25155	0,24486	0,23971	

K, E, G – объемный модуль упругости, модуль Юнга и модуль сдвига, соответственно. ν – касательный модуль объемной упругости (коэффициент Пуассона). Индексы V, R, H – обозначают схемы усреднения Фогта, Ройса и Хилла, соответственно. Методы усреднения Фойгта-Рейсса-Хилла обеспечивают простой способ оценки упругих констант текстурированного поликристалла с точки зрения его кристаллографической текстуры и упругих констант составляющих кристаллитов.

В таблице 5 рассмотрены собственные значения матрицы жесткости для каждого функционала.

Таблица 5. Собственные значения матрицы жесткости

Функционал	$\lambda_1, \text{ ГПа}$	$\lambda_2, \text{ ГПа}$	$\lambda_3, \text{ ГПа}$	$\lambda_4, \text{ ГПа}$	$\lambda_5, \text{ ГПа}$	$\lambda_6, \text{ ГПа}$
HSE06	115,6	115,6	115,6	225,94	225,94	563,68
PBE	117,05	117,05	117,05	234,15	234,15	589,67
B3PW	114,4	114,4	114,4	222,58	222,58	552,04
B3LYP	114,78	114,78	114,78	218,75	218,75	218,75

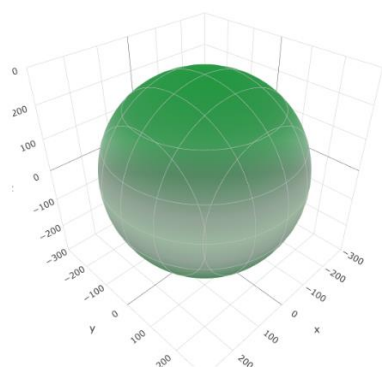
Собственные значения и векторы позволяют понять, как материал реагирует на воздействие механических сил и в каких направлениях происходит деформация под воздействием напряжения.

Из таблицы 5 можно заметить, что иттрий-алюминиевый гранат имеет одинаковые собственные значения по всем трем осям ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$). Это указывает на изотропию в отношении продольных направлений, что характерно для кубической симметрии. Значения λ_4 и λ_5 равны, что также свойственно кристаллам кубической симметрии.

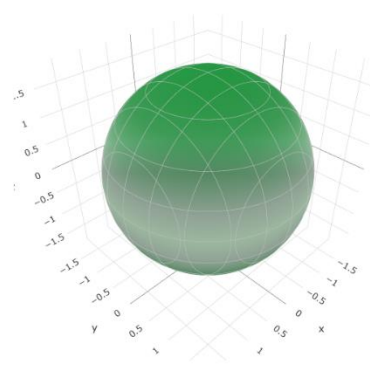
Примитивная ячейка с функционалом HSE06

Таблица 6. Модули упругости

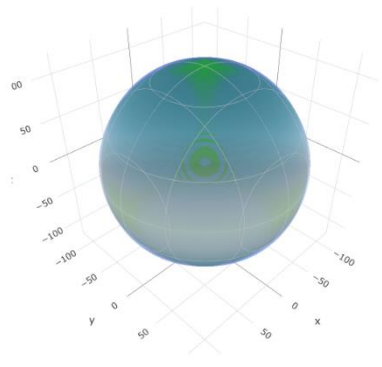
	Модуль Юнга		Линейная сжимаемость		Модуль сдвига		Коэффициент Пуассона	
	E_{min}	E_{max}	β_{min}	β_{max}	G_{min}	G_{max}	ν_{min}	ν_{max}
Значение	282,33 ГПа	287,79 ГПа	1,7741 ТПа ⁻¹	1,7741 ТПа ⁻¹	112,97 ГПа	115,6 ГПа	0,23874	0,25316
Анизотропия	1,019		1,0000		1,023		1,0604	
Ось	0,0000	0,5774	0,0000	0,8660	0,7071	0,0000	0,7071	0,7071
	0,0000	0,5774	0,0000	0,0000	-0,0003	0,0000	-0,0002	-0,0005
	1,0000	0,5773	1,0000	0,5000	0,7071	1,0000	0,7071	0,7072
Вторая ось					0,7071	1,0000	0,0000	0,0003
					-0,0005	0,0000	-1,0000	1,0000
					-0,7071	-0,0000	0,0000	0,0003



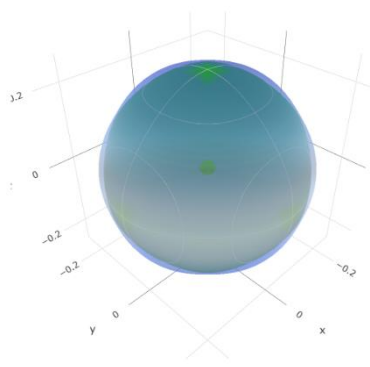
а)



б)



в)



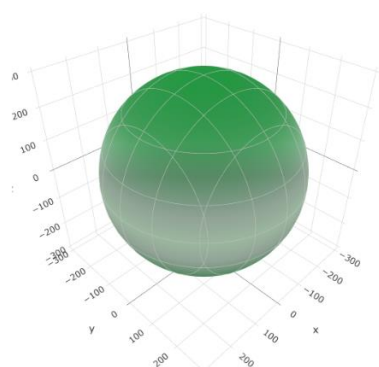
г)

Рисунок 2. 3D визуализация: модуля Юнга (а), линейной сжимаемости (б), модуля сдвига (в) и коэффициента Пуассона (г)

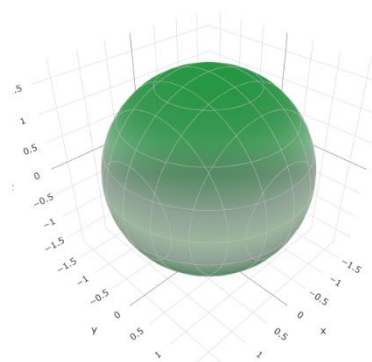
Примитивная ячейка с функционалом PVE

Таблица 7. Модули упругости

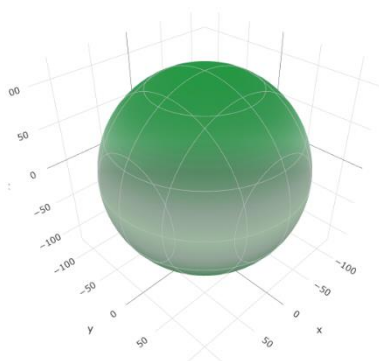
	Модуль Юнга		Линейная сжимаемость		Модуль сдвига		Коэффициент Пуассона	
	E_{min}	E_{max}	β_{min}	β_{max}	G_{min}	G_{max}	ν_{min}	ν_{max}
Значение	292,99 ГПа	293,04 ГПа	1,6959 ТПа ⁻¹	1,6959 ТПа ⁻¹	117,05 ГПа	117,07 ГПа	0,25149	0,25163
Анизотропия	1		1,0000		1		1,0006	
Ось	0,5774	0,0000	0,1206	0,9239	0,0000	0,7071	-0,7071	0,7071
	0,5774	0,0000	0,9160	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	-0,0002
	0,5773	1,0000	-0,3827	0,3827	1,0000	-0,7071	0,7071	0,7071
Вторая ось					-0,9397	-0,7071	0,0000	0,7071
					0,3420	-0,0002	-1,0000	-0,0006
					-0,0000	-0,7071	0,0000	-0,7071



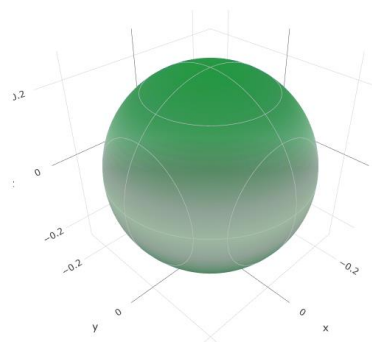
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3. 3D визуализация: модуля Юнга (а), линейной сжимаемости (б), модуля сдвига (в) и коэффициента Пуассона (г)

Примитивная ячейка с функционалом ВЗРВ

Таблица 8. Модули упругости

	Модуль Юнга		Линейная сжимаемость		Модуль сдвига		Коэффициент Пуассона	
	E_{min}	E_{max}	β_{min}	β_{max}	G_{min}	G_{max}	ν_{min}	ν_{max}
Значение	277,85 ГПа	284,29 ГПа	1,8115 ТПа ⁻¹	1,8115 ТПа ⁻¹	111,29 ГПа	114,4 ГПа	0,23537	0,25263
Анизотропия	1,023		1,0000		1,028		1,0734	
Ось	0,0000	0,5774	0,7934	0,0000	0,7071	0,0000	0,7071	0,7071
	0,0000	0,5774	0,0000	0,0000	-0,0003	0,0000	-0,0002	-0,0004
	1,0000	0,5773	0,6088	1,0000	0,7071	1,0000	0,7071	-0,7071
Вторая ось					0,7071	1,0000	0,7071	0,0003
					-0,0005	0,0002	-0,0006	1,0000
					-0,7071	-0,0000	-0,7071	-0,0003

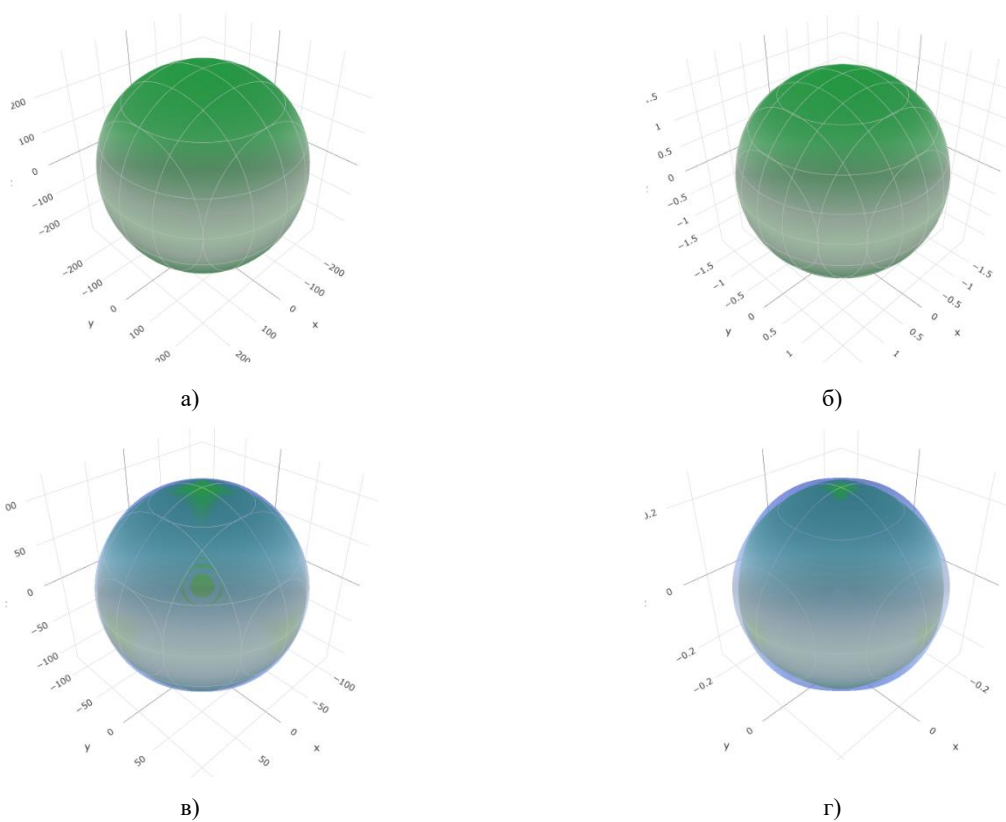


Рисунок 4. 3D визуализация: модуля Юнга (а), линейной сжимаемости (б), модуля сдвига (в) и коэффициента Пуассона (г)

Примитивная ячейка с функционалом V3LYP

Таблица 9. Модули упругости

	Модуль Юнга		Линейная сжимаемость		Модуль сдвига		Коэффициент Пуассона	
	E_{min}	E_{max}	β_{min}	β_{max}	G_{min}	G_{max}	ν_{min}	ν_{max}
Значение	272,54 ГПа	283,63 ГПа	1,8648 ТПа ⁻¹	1,8648 ТПа ⁻¹	109,38 ГПа	114,78 ГПа	0,22309	0,25331
Анизотропия	1,041		1,0000		1,049		1,1355	
Ось	0,0000	0,5774	0,0000	0,0000	0,7071	0,0000	0,7071	0,7071
	0,0000	0,5774	0,0000	0,0000	-0,0003	0,0000	-0,0002	-0,0005
	1,0000	0,5773	1,0000	1,0000	0,7071	1,0000	0,7071	0,7072
Вторая ось					0,7071	-0,1736	0,7071	0,0003
					-0,0005	0,9848	-0,0006	1,0000
					-0,7071	-0,0000	-0,7071	0,0003

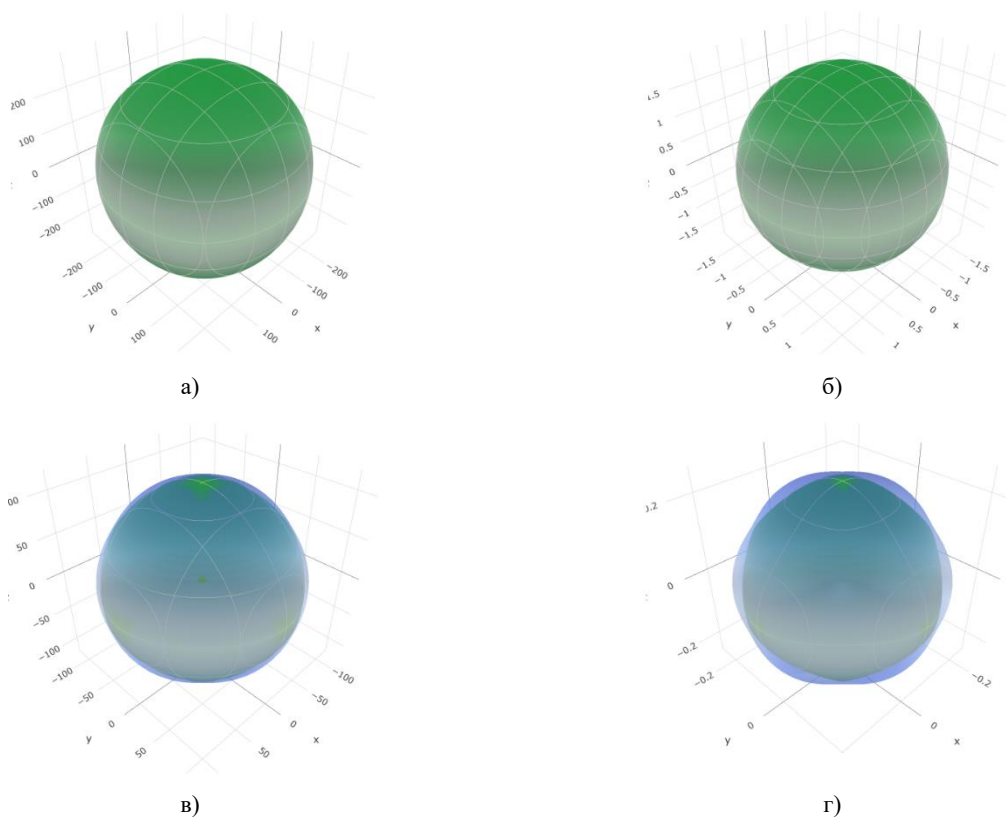


Рисунок 5. 3D визуализация: модуля Юнга (а), линейной сжимаемости (б), модуля сдвига (в) и коэффициента Пуассона (г)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы были определено, что два гибридных обменно-корреляционных функционала V3PW и HSE06 показывают очень точные результаты способные дать возможность для дальнейшего более глубокого изучения механических свойств кристалла при изменениях условий системы. Погрешности при расчетах очень низкие (0,1%). Это позволяет нам получить точные и контролируемые данные о механических свойствах иттрий-алюминиевого граната, что особенно важно для такой сложной структуры как кристалл $Y_3Al_5O_{12}$. Изучение механизмов деформации кристалла показало, что кристалл иттрий-алюми-

ниевого граната, являясь кубическим кристаллом, деформируется равномерно по всем осям, на что указывают собственные значения матрицы жесткости и упругие тензорные константы.

Благодарности

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19574768 «Экспериментальное и теоретическое исследование радиационной стойкости функциональных керамических и кристаллических материалов для космических применений и ядерной энергетики»).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Franta D., Mureşan M. G. Wide spectral range optical characterization of yttrium aluminum garnet (YAG) single crystal by the universal dispersion model // *Optical Materials Express*. – 2021. – Vol. 11. – No. 12. – P. 3930–3945.
2. Kalisky Y. Hosts for Solid-State Luminescent Systems // *Wide-Gap Luminescent Materials: Theory and Applications*. – Boston, MA : Springer US, 2013. – P. 1–11.
3. Huang Z., Feng J., Pan W. Elastic properties of YAG: First-principles calculation and experimental investigation // *Solid state sciences*. – 2012. – Vol. 14. – No. 9. – P. 1327–1332.
4. Chen J. et al. Ab initio study of a charged vacancy in yttrium aluminum garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2008. – Vol. 20. – No. 32. – P. 325212.
5. Xu Y. N., Ching W. Y. Electronic structure of yttrium aluminum garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) // *Physical Review B*. – 1999. – Vol. 59. – No. 16. – P. 10530.
6. Laun J., Vilela Oliveira D., Bredow T. Consistent gaussian basis sets of double-and triple-zeta valence with polarization quality of the fifth period for solid-state calculations // *Journal of Computational Chemistry*. – 2018. – Vol. 39. – No. 19. – P. 1285–1290.
7. Peintinger M. F., Oliveira D. V., Bredow T. Consistent Gaussian basis sets of triple-zeta valence with polarization quality for solid-state calculations // *Journal of Computational Chemistry*. – 2013. – Vol. 34. – No. 6. – P. 451–459.
8. Trof W. J. Yttrium Aluminum Garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) // *Handbook of Optical Constants of Solids*. – Academic Press, 1997. – P. 963–986.
9. Xu Y. N., Ching W. Y. Electronic structure of yttrium aluminum garnet ($Y_3Al_5O_{12}$) // *Physical Review B*. – 1999. – Vol. 59. – No. 16. – P. 10530.
10. Spencer E. G. et al. Microwave elastic properties of nonmagnetic garnets // *Journal of Applied Physics*. – 1963. – Vol. 34. – No. 10. – P. 3059–3060.
11. Kitaeva V. F., Zharikov E. V., Chisty I. L. The properties of crystals with garnet structure // *Physica status solidi (a)*. – 1985. – Vol. 92. – No. 2. – P. 475–488.

 $Y_3Al_5O_{15}$ КРИСТАЛЫНЫҢ ЭЛЕКТРОНДЫ ЖӘНЕ СЕРПІМДІ ҚАСИЕТТЕРІН МОДЕЛЬДЕУ

**Г. М. Бавбекова^{1*}, А. Ахмедов¹, Ф. У. Абуова¹, Р. Н. Асылбаев²,
А. У. Абуова¹, Г. П. Тұрсынбаева¹, Г. Д. Кабдрахимова¹**

¹ Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана, Қазақстан

² А. Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар, Қазақстан

*Байланыс үшін E-mail: guldar_87@mail.ru

Бұл ғылыми жұмыста біз компьютерлік модельдеу әдістерін қолдана отырып, иттрий-алюминий гранатына кешенді зерттеу жүргіздік. Біздің жұмысымыз серпімді қасиеттерді дәл талдауға, күй теңдеулерін жасауға және кристалдық және аймақтық құрылымдарды зерттеуге бағытталған. Біз заманауи есептеу әдістерін қолдана отырып, серпімділік модулі және Пуассон коэффициенті сияқты материалдың механикалық параметрлерін егжей-тегжейлі зерттедік. Виртуалды модельдеу әдістері материалдың механикалық сипаттамаларын зерттеуге мүмкіндік береді. Негізгі назар кристалдың серпімді қасиеттерін дәл көрсететін компьютерлік модельдерді құруға және тексеруге бағытталған. Эксперименттік мәліметтерге қатысты әртүрлі гибриді функционалдарды пайдалану кезінде алынған мәндерді салыстыру жүргізілді. Виртуалды модельдер материалдың механикалық сипаттамаларын жан-жақты зерттеуге ғана емес, сонымен қатар нақты эксперименттік мәліметтерге айтарлықтай жақын нәтижелер берді. Салыстырулар келесі параметрлер бойынша жүргізілді: ұяшық параметрлері, тыйым салынған аймақ энергиясы, кристалл атомдарының тиімді зарядтары, күй теңдеулері және серпімділік параметрлері. Сонымен қатар, эксперименттік мәліметтерге қатысты қателік деңгейлері анықталды. Біз ВЗРВ, ВЗЛҮР, HSE06, PBE сияқты әртүрлі алмасу-корреляциялық гибриді функционалдарды қолдану арқылы қол жеткізілген иттрий-алюминий гранатының кристалды құрылымын талдау нәтижелерін ұсынамыз. Зерттеудің бұл аспектісі кристалдық тордың параметрлерін талдауды, кристалдағы атомдардың таралуын және материалдың қасиеттерін толық түсіну үшін маңызды құрылымды қамтиды.

Түйін сөздер: иттрий-алюминий гранаты, тығыздықтың функционалдық теориясы, тыйым салынған аймақ, элементар ұяшық, серпімділік қасиеттері, модельдеу.

MODELING OF THE ELECTRONIC AND ELASTIC PROPERTIES OF THE $Y_3Al_5O_{15}$ CRYSTAL

G. M. Baubekova^{1*}, A. Akhmedov¹, F. U. Abuova¹, R. N. Assylbayev²,
A. U. Abuova¹, G. P. Tursumbayeva¹, G. D. Kabdrakhimova¹

¹ L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

² A. Margulan Pavlodar Pedagogical University, Pavlodar, Kazakhstan

*E-mail for contacts: guldar_87@mail.ru

In this scientific work, we conducted a comprehensive study of yttrium aluminum garnet using computer modeling methods. Our efforts are focused on the precise analysis of elastic properties, the development of equations of state, as well as a detailed study of crystal and band structures. We conducted a detailed study of the mechanical parameters of the material, such as the modulus of elasticity and the Poisson's ratio, using modern computational methods. Virtual modeling methods allow us to study in detail the mechanical characteristics of the material. The main focus is on the creation and verification of computer models that accurately reflect the elastic properties of the crystal. The values obtained using various hybrid functionals were compared with experimental data. Virtual models allowed not only to study in detail the mechanical characteristics of the material, but also provided results that are significantly close to real experimental data. Comparisons were carried out according to the following parameters: cell parameters, band gap energy, effective charges of crystal atoms, equations of state and elastic properties. Also, the error levels relative to the experimental data are determined. We present the results of the analysis of the crystal structure of yttrium aluminum garnet achieved using various exchange-correlation hybrid functionals such as B3PW, B3LYP, HSE06, PBE. This aspect of the study includes the analysis of the crystal lattice parameters, the distribution of atoms in the crystal and the band structure, which is important for a complete understanding of the properties of the material.

Keywords: yttrium-aluminum garnet, density functional theory, band gap, unit cell, elastic properties, modeling.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-34-44>

УДК 685.34.036

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРЕСНОЙ ВОДЫ МИКРОПЛАСТИКОМ: ИСТОЧНИКИ, ПОСЛЕДСТВИЯ И СТРАТЕГИИ СМЯГЧЕНИЯ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

**К. Бексейтова^{1,2*}, А. Байменов^{1,2}, У. Жантукеев¹, Е. Сайлауханулы¹,
А. В. Есин³, С. Михаловский⁴, С. Азат¹**

¹ *Сатбаев Университет, Алматы, Казахстан*

² *Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

³ *Кафедра химической инженерии, Инженерный факультет,
Эскишехирский технический университет, Эскишехир, Турция*

⁴ *ANAMAD Ltd., Сассекский инновационный центр Science Park Square,
Фалмер, Брайтон, Великобритания*

*E-mail для контактов: bekalsu@mail.ru

Повсеместное присутствие микропластика в пресноводных экосистемах стало серьезной экологической проблемой, имеющей далеко идущие последствия как для водной жизни, так и для благополучия человека. В этом комплексном обзоре исследуется многогранная проблема загрязнения пресной воды микропластиком, углубляясь в его разнообразные источники, механизмы переноса, воздействие на окружающую среду, методы обнаружения и стратегии смягчения последствий. Экологические воздействия загрязнения микропластиком многочисленны и разнообразны, затрагивая водные организмы, пищевые сети и биоразнообразие в целом. Кроме того, загрязнение микропластиком вызывает опасения для здоровья человека из-за потенциальных рисков, связанных с потреблением загрязненных ресурсов пресной воды.

Обзор также выделяет факторы окружающей среды, влияющие на численность и распространение микропластика в пресноводных экосистемах, такие как гидрологические условия, антропогенная деятельность и биологические взаимодействия. Рассматриваются пути транспортировки и судьба микропластика, включая седиментацию, адсорбцию и биоаккумуляцию. В заключение статьи подчеркивается острая необходимость глобальной осведомленности, исследований и скоординированных действий для решения критической проблемы загрязнения пресной воды микропластиком.

Ключевые слова: микропластик, загрязнение пресной воды, источники, воздействие на окружающую среду.

ВВЕДЕНИЕ

Пресноводные экосистемы, включающие реки, озера и источники подземных вод, представляют собой бесценные ресурсы, необходимые для поддержания жизни на Земле. Микропластик, который раньше считался преимущественно морской проблемой, теперь признан серьезным загрязнителем, проникающим в пресноводные водоемы по всему миру. Их источники разнообразны и связаны с фрагментацией более крупных пластиковых отходов и промышленными процессами. Поскольку микропластик сохраняется в окружающей среде, вопросы, связанные с его транспортировкой, воздействием на водную жизнь и последствиями для здоровья человека, становятся все более актуальными.

С 1940-х годов, когда производство пластмасс стало массовым, мы наблюдаем стремительный рост этой индустрии. К сожалению, вместе с удобствами и практичностью, которые принесли нам пластиковые изделия, пришла и теневая сторона – загрязнение биосферы микропластиком [1]. За последние три десятилетия мировое производство пластика выросло почти в три раза, и ожидается, что к 2050 году оно достигнет 33 миллиардов тонн [2, 3, 4]. Несмотря на рост осведомленности о пластиковом загрязнении окружающей среды и меры по его снижению, годовое производство пластика продолжает расти. Иссле-

дования [5], показали, что в обрабатывающей промышленности ежегодно образуется более 280 миллионов метрических тонн пластиковых отходов [6]. Процент мировых водных пластиковых загрязнителей, попадающих в морскую экосистему [7] на основе недавно опубликованных данных, показан на рисунке 1. Большинство крупнейших в мире загрязняющих водоемов находятся в Азии, а также несколько в Африке.

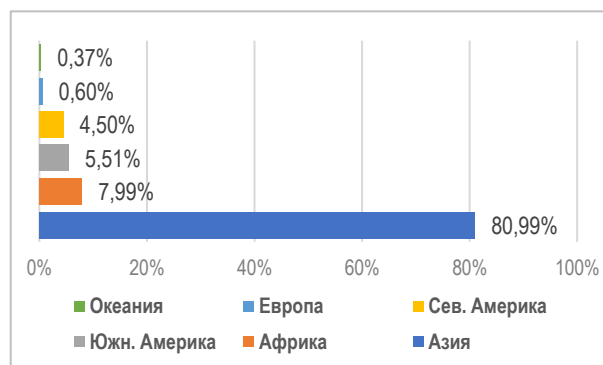


Рисунок 1. Глобальное загрязнение водных ресурсов пластиком (на долю более 1000 рек, 80% из которых расположены в Азии).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Классификация микропластика

Пластмассы – это синтетические полимеры, которые по своей природе податливы (гибки), и им можно придавать различные формы [8]. Пластик состоит из длинных цепочек полимеров, состоящих из углерода, кислорода, водорода, кремния и хлоридов, которые получают из природного газа, нефти и угля [9]. Полиэтилен (ПЭ), полиамид (ПА), полипропилен (ПП), полиэстер (ПЭС), полиуретан (ПУ), акрил (АК), полистирол (ПС), полиэтилентерефталат (ПЭТ), поливинилхлорид (ПВХ), полиэтилен высокой плотности (ПЭВП), полиэтилен низкой плотности (ПЭНП), полиимид (ПИ), полиметилметакрилат (ПММА), политетрафторэтилен (ПФЭ), поливинилхлорид (ПВХ) и полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) являются наиболее распространенными синтетическими полимерами, на долю которых приходится 90% мирового производства пластика [10, 11]. Материалы, изготовленные из пластика, дешевы. А благодаря низкой стоимости производства, простоте, долговечности, прочности, коррозионной стойкости, хорошей тепло- и электропроводности, а также физико-химическим свойствам пластик стал важным и универсальным материалом во всех аспектах нашей жизни.

Микропластик – это кусочки пластика размером от миллиметра до нанометра, невидимые для человеческого глаза. Термин «микропластик» определялся по-разному разными исследователями (см. [12]), включая семинар по этой теме. Микропластик определяется как имеющий размер <5 мм [13] (333 нанометра считаются практическим нижним пределом, когда для отбора проб используются нейстонные сети). Микропластики подразделяются на две группы в зависимости от их происхождения: первичные и вторичные микропластики [14].

Первичный микропластик представляет собой синтетические полимеры микроразмера, которые попадают непосредственно в окружающую среду в виде мельчайших частиц. Они используются в качестве отшелушивающих веществ в различных операциях, таких как химические составы, абразивные среды, химическая и нефтехимическая очистка, а также производство синтетической одежды. Их можно произвольно добавлять в такие предметы, как чистящие средства в гигиене и косметике (например, гели для душа). Они также могут быть вызваны истиранием крупных пластиковых предметов во время производства, использования или технического обслуживания, например, эрозией шин во время вождения или истиранием синтетического текстиля во время стирки. Микрошарики представляют собой форму первичного пластика (размером 2 мм), состоящего из гранул полиэтилена, полипропилена и полистирола и используемых в косметических и медицинских товарах [15].

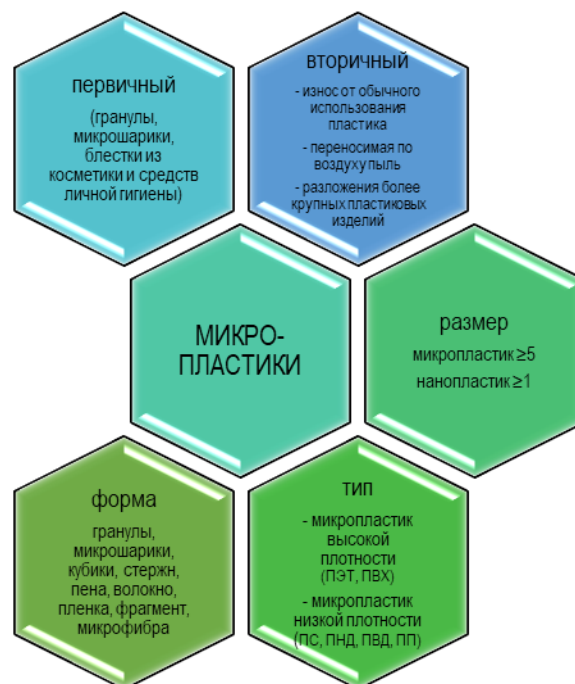


Рисунок 2. Классификация микропластика по размеру, типу и форме

Вторичный микропластик – это микропластик, образующийся в результате разложения более крупных пластиковых изделий на микроскопические кусочки пластика в морской экосистеме. Это происходит в результате экологических изменений, таких как микробное разложение, фотокатализ, высокотемпературное разложение, термическое разложение, гидролиз и другие процессы выветривания, связанные с неизбежным сбросом, например, брошенными пластиковыми пакетами или непредвиденными потерями, например, рыболовными снастями. Микропластик в воде может как циркулировать, так и тонуть (рисунок 2) [16].

Микропластик имеет неправильную форму, например, кубическую, сферическую и стержневую, в зависимости от его морфологических особенностей, что следует учитывать при оценке рисков для окружающей среды и человека. Острые частицы микропластика могут вызвать токсичность, физически стимулируют организм человека. Кроме того, при синтезе пластиковых полимеров используются различные химические вещества, в зависимости от конечного использования, большинство из которых являются разрушителями жизненно-важных органов человека.

2. Влияние микропластика на живые организмы

Важно понимать пути воздействия микропластика на человека. Распространенными из них являются пероральный прием, вдыхание и контакт с кожей. Среди них основным путем воздействия является пероральный прием. Фактически, люди часто подвергаются воздействию микропластика несколькими способами одновременно [17].

Пероральный прием. Микропластик присутствует в наших повседневных потребностях, таких как питьевая вода, вода в бутылках, морепродукты, соль, сахар, чайные пакетики, молоко и т. д. Европейцы подвергаются воздействию около 11 000 частиц микропластика на человека в год из-за потребления моллюсков, а в зависимости от потребления пищи поступление пластиковых частиц в организм человека составляет 39 000–52 000 частиц на человека в год [18]. Подсчитано, что люди, заказывающие еду на вынос 4–7 раз в неделю, могут потреблять 12–203 кусочка микропластика через контейнеры [19]. Кроме того, исследования показывают, что поверхность силиконовых резиновых детских кроваток разрушается при их стерилизации паром, в ходе которой микрочастицы пластика выбрасываются в окружающую среду. По оценкам, общее количество микрочастиц пластика, попадающих в организм ребенка в течение одного года нормального кормления из бутылочки, достигает около 0,66 миллиона [20].

Вдыхание. Микропластик в воздухе состоит в основном из частиц и волокон полиэтилена, полистирола и полипропилена с размерами от 10 до 8000 мкм [21]. Крупнейшим источником микропластика (84%) в атмосфере являются дороги. Сообщается, что средняя концентрация микропластических волокон составляет 5,4 волокна/м³ в наружном воздухе и 0,9 волокна/м³ в воздухе помещений в Париже [22]. Средняя концентрация микропластика в наружном воздухе в Шанхае составляет 1,42 частиц/м³, а диапазон размеров составляет 23–5000 мкм [23]. По оценкам, ежегодное потребление микропластика колеблется от 74 000 до 121 000 частиц, если учитывать как пероральное, так и вдыхание. В легких человека обнаружены частицы микропластика размером менее 5,5 мкм и микропластические волокна размером 8,12–16,8 мкм, основными компонентами которых являются полиэтилен и полипропилен. Размер микропластика, обнаруживаемого в легочной ткани, меньше, чем в атмосфере. Это еще раз подтверждает возможность воздействия микропластика на человека при вдыхании и заставляет обратить внимание на потенциальный вред для организма человека [24].

Обычно считается, что микропластик не проходит через кожный барьер, но он все равно может увеличивать риск воздействия, откладываясь на коже. Например, использование потребительских товаров, содержащих микропластик (таких как крем для лица и очищающее средство для лица), увеличивает риск воздействия полиэтилена. Защитные чехлы для мобильных телефонов (PMPC) могут во время использования образовывать микропластик, попадающий на руки человека. Когда дети ползают или играют, они могут вступать в контакт с микропластиком на земле. Во время воздействия микропластика на кожу могут всасываться некоторые типичные пластиковые добавки, в том числе бромированные антипирены (BFR), бисфенолы (BP), триклозан (TCS) и фталаты.

Принято считать, что после попадания в организм человека микропластик выводится через желудочно-кишечный тракт и желчные пути. Однако исследователи обнаруживают существование микропластика в крови человека [25]. Люди начинают переосмысливать вред микропластика для здоровья человека.

Недавний обзор показывает, что микропластик транспортируется по всему организму посредством кровообращения, а наличие микропластика обнаружено в 15 биологических компонентах человека, таких как селезенка, печень, толстая кишка, легкие, фекалии, плацента, грудное молоко и т. д. Органами с высоким содержанием являются толстая кишка (28,1 частиц/г) и печень (4,6 частиц/г). К основным типам обнаруженных микропластиков относятся ПЭ, ПЭТ, ПП, ПС, ПВХ и ПК. Беременные женщины и младенцы являются чувствительными людьми, подвергающимися воздействию микропластика [26].

Микропластик не только сам по себе токсичен, но и является переносчиком многих загрязняющих веществ, попадающих в биологические ткани и органы.

3. Транспорт и судьба микропластика

Среди водной среды больше всего исследований было проведено по распространенности и характеристикам микропластика в морской воде. Лишь в последнее время проводятся исследования микропластика в различных водных средах, включая пресную, сточные и грунтовые воды.

Интенсивная экономическая деятельность ухудшает качество воды, и было высказано предположение, что на концентрацию микропластика влияет экономическая деятельность, основанная на корреляции между низким качеством воды и высокими концентрациями микропластика. Некоторые частицы, возможно, мигрировали из отдаленных мест, но корреляция между микропластиком и плотностью населения указывает на то, что пластиковые частицы произошли из земных источников. В частности, содержание мелкого микропластика было самым высоким в регионах, связанных с более интенсивной антропогенной деятельностью. Однако даже в регионах с низкой плотностью населения высокие концентрации микропластика обнаруживаются в периферийных точках промышленно развитых территорий. В целом уровень загрязнения снижался по мере увеличения расстояния от устья до открытого моря. Например, концентрация микропластика уменьшалась по мере увеличения расстояния от устья Янцзы до Восточно-Китайского моря. Напротив, на тосканском побережье Италии количество плавающего микропластика увеличивалось по мере удаления от побережья [27].

Исследование характеристик сезонного распределения микропластика на шести пляжах Циндао, Китай, показало, что географическая изменчивость микропластика связана с прибрежными течениями [28]. Количество микропластика на шести пляжах увеличивалось с востока на запад, что совпадало с направлением океанского течения.

Изменения погоды, такие как осадки, снегопады, таяние снегов и тайфуны, среди других факторов окружающей среды, также влияют на обилие микропластика. В Мраморном море Турции наибольшая концентрация микропластика обнаружена осенью, а наименьшая – летом [29].

Хотя были проведены обширные исследования микропластика морской воды, информации о микропластике пресной воды недостаточно [30]. Тем не менее, исследования распространенности и поведения микропластика в пресной воде набирают обороты. Важность пресной воды нельзя недооценивать, учитывая, что она является источником воды, которая подается в домохозяйства посредством водоочистки.

Трансформация микропластика в пресноводных экосистемах под воздействием биосферных компартиментов. Внутренние пресноводные водоемы внутри и вокруг районов производства пластмасс подвергаются непосредственному воздействию окружающей среды, что отражает наличие микропластика в пресноводных водоемах. Также были проведены исследования содержания микропластика в отложениях по местам и сезонам, чтобы понять влияние окружающей среды на пресную воду. Микропластик (13,3 шт./л), что более чем в два раза превышает количество в контрольной зоне, был обнаружен в крупнейшей текстильной промышленной зоне Азии, расположенной в Китае. Из-за производственной и торговой деятельности близлежащей текстильной промышленности в местной пресной воде и отложениях был обнаружен высокий уровень загрязнения микропластиком. В поверхностных водах озера Окс-Боу в Нигерии 73,1% обнаруженного микропластика представляло собой гранулы, и было высказано предположение, что большое количество бисера, вероятно, было вызвано культурным наследием, связанным с производством бисера и использованием бисера в качестве рыболовных снастей [31]. Озеро Тайху в бассейне реки Тайху отличалось относительно высокой концентрацией микропластика (3,4–25,8 шт./л); Это можно объяснить тем, что промышленность и сельское хозяйство обеспечивают 14% валового внутреннего продукта Китая. Доминирующей частицей был целлофан, который относят к типичным полусинтетическим материалам [32].

По данным анализа проб воды и донных отложений в прудах Европейского Карпатского бассейна (регион Венгрии), концентрация микропластика на выходе из пруда всегда была ниже, чем на входе. Можно предположить, что пруд служит хранилищем микропластика. Наземные источники являются важными источниками микропластика в окружающей среде, а пруды для сбора ливневых вод также играют роль в транспортировке микропластика с суши в водную среду [33].

Поскольку в разных регионах пресноводные водоемы разного размера и с разным рельефом, гидрологический процесс является одним из важнейших

факторов, влияющих на численность и распространение микропластика. Количество микропластика, как правило, увеличивается в нижнем течении рек Сучжоу и Хуанпу в Китае, а уровень загрязнения микропластиком высок в городских центрах и устьях рек. Напротив, количество микропластика в виде волокон имеет тенденцию к уменьшению от небольших городских водоемов к морю.

Факторы, влияющие на распространение микропластика в пресной воде. Микропластик, присутствующий в пресной воде, различается по численности и распределению в зависимости от присущих ему свойств и факторов окружающей среды. Результаты анализа реальных проб окружающей среды из прудов с ливневой водой в Дании подтвердили, что мелкие частицы более распространены, чем крупные, из-за свойств микропластика. Кроме того, согласно Закону удара, конечная скорость частицы пропорциональна квадрату диаметра частицы; поэтому крупные частицы имеют тенденцию либо плавать на поверхности воды, либо опускаться на дно пруда [34]. Пробы воды из реки Чиваленгке в Индонезии содержали множество мелких частиц микропластика, тогда как крупные частицы были обнаружены в отложениях. Плотность полимера, а также конечная скорость, обусловленная размером частиц микропластика, могут влиять на седиментацию пластиковых частиц.

Плавающие твердые частицы вдоль рек Рейн и Маас в Нидерландах показали обилие микропластика; кроме того, в отложениях эстуария обнаружено большое количество микропластика [35]. Микропластик высокой плотности со временем оседает в отложениях, но и микропластик низкой плотности также часто оседает.

Это происходит из-за взаимодействия микропластика с агрегатами, биообрастаниями и фекалиями, которые могут улучшить седиментацию за счет снижения плавучести микропластика и увеличения плотности частиц. Ниже по течению реки Накдонг в Корее в отложениях обнаружено в 2827 раз больше микропластика, чем в поверхностном слое. Частицы с большими размерами и шероховатой поверхностью легко образуют биопленки и больше подвержены деградации. Из-за свойств микропластика и взаимодействия с окружающими веществами микропластик не распределяется равномерно в водной системе. В пользу этого свидетельствует различное распределение микропластика в пробах воды и донных отложений, полученных с помощью планктонных сетей из озера Тайху, Китай [36].

Распространение микропластика подвержено влиянию окружающей среды, прежде всего антропогенным и гидродинамическим факторам. В девяти озерах Патагонии в Аргентине обнаружены микропластики, главным образом, из городских поселений, текстиля и рыболовства. Микропластик, обнаруженный в озере Онтарио в Канаде, также коррелирует с близостью к городским районам, что указывает на

жизненно важный вклад городских территорий в производство микропластика.

Антропогенные вещества на основе красителей и различные химические композиции, такие как целлюлоза, полиэтилен, ПЭТ и ПВХ, происходят из различных источников, включая промышленность пластмасс, свалки, дороги и сточные воды. Химический состав, который может конкретно подтвердить влияние городских центров, представляет собой ацетат целлюлозы, который в основном содержится в выбрасываемых коммерческих сигаретных окурках [37]. В подтверждение этого пространственное распределение микропластика, обнаруженного в реках Сучжоу и Хуанпу в Китае, показало тенденцию к увеличению в городах и устьевых водных путях. Концентрация микропластика в озере Мид в США была высокой в местах прямого и искусственного использования и внесения. Широко известно, что сточные воды отражают все особенности города и напрямую влияют на пресную воду. Однако сточные воды очистных сооружений из трех рек водосбора Трента в Великобритании не привели к значительному увеличению концентрации микропластика, что подтверждает возможность существования различий в составе сточных вод. В целом, коммерческие и промышленные районы выделяют больше микропластика, чем жилые районы и районы автомагистралей [38]. Примечательно, что на Тибетском нагорье в Китае был обнаружен полиэтилен, который, как было показано, произошел из листов, используемых для мульчирования поверхности обрабатываемых почв во время выращивания сельскохозяйственных культур. Поскольку состав микропластика может варьироваться в зависимости от землепользования вокруг пресной воды, было предложено учитывать использование окружающих земель при анализе нагрузки микропластиком. Инновационным фактором, отражающим интенсивность антропогенной деятельности, является индекс ночной освещенности, который могут учитывать туристы и жители [39].

Используемые методы отбора проб пресноводной среды. Планктонную сеть, обычно используемую для извлечения микропластика из морской воды, сложно использовать в пресной воде из-за различных условий, преобладающих в этой среде. Планктонную сеть нельзя использовать, если водоем не велик и недостаточно глубок, чтобы вместить троллей. Кроме того, необходимы такие объекты, как лодки и мосты. Более того, измеренная величина фильтрации может быть неточной даже при измерении расходомером. В трех реках водосборного бассейна Трента в Великобритании вместо сетей «Манта» и «Нейстон» использовался дночерпательный метод, поскольку отбор проб был ограничен небольшими пресноводными водоемами [40]. Следует выбрать метод отбора проб, подходящий для среды отбора проб пресной воды.

Размер ячейки является одним из решающих факторов при выборе метода отбора проб. На реке Офан-

то в Италии, когда для отбора проб использовались планктонные сети с размером ячеек 333 мкм, через сеть проходили мелкие частицы, что приводило к снижению концентрации микропластика. Согласно исследованию гразницы в концентрации микропластика в зависимости от используемого размера ячейки, при использовании ячейки размером 80 мкм было обнаружено до 100 000 раз больше частиц микропластика, чем при использовании ячейки 450 мкм [41]. Поскольку размер ячеек может повлиять на концентрацию микропластика в полевых условиях, необходимо соблюдать осторожность при выборе подходящего размера ячеек.

Для удаления органических веществ из проб использовалось разложение с использованием кислотных и основных растворов, но поскольку они растворяют полимеры и неэффективны при удалении некоторых органических веществ, был предложен альтернативный метод, использующий окислительную обработку. Мокрое перекисное окисление (МПО; реакция Фентона) не оказывает существенного влияния на полимеры и эффективно удаляет органические вещества. Однако из-за высокой температуры (60–100 °C), возникающей в процессе окисления, некоторые полимеры, такие как ПА и ПЭ, плавятся или их масса уменьшается. В результате реакции окисления МПО, а также условий выветривания окружающей среды микропластики обесцвечиваются, что приводит к обнаружению прозрачных частиц при анализе микропластика [42]. При выборе окислителя для удаления органических веществ следует учитывать его влияние на повышение температуры, чтобы можно было поддерживать температуру ниже 60 °C, и проводить дальнейшие исследования по ограничению обесцвечивания микропластика.

Хотя более плотные растворы лучше удаляют микропластик из образцов, необходимо учитывать несколько факторов, таких как токсичность и стоимость. Хлорид цинка имеет плотность 1,7 г/см³, но имеет недостатки, связанные с коррозией и токсичностью. Дигидрат вольфрамата натрия (Na₂WO₄·2H₂O) и полистратмат натрия (3Na₂WO₄·9WO₃·2H₂O) содержат барит и имеют высокую плотность 1,4–1,6 г/см³, но они дороги. Поскольку NaCl имеет плотность 1,0–1,2 г/см³, его сложно отделить от микропластика с высокой плотностью, но он недорогой, обладает высокой растворимостью и низкой токсичностью. По этой причине во многих исследованиях в качестве раствора разделения по плотности был выбран NaCl. Для эффективного разделения микропластика необходимо разработать соответствующий протокол разделения по плотности.

Идентификация микропластика. Для выявления микропластика в водных системах было внедрено несколько аналитических инструментов.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) может анализировать поверхность микропластика на наноуровне, диапазон обнаружения не выражен, по-

сколькo он не может анализировать типы микропластика. В начале исследования количественная оценка микропластика проводилась невооруженным глазом или с помощью микроскопа. Увеличилась частота использования приборов инфракрасного анализа для качественной оценки различных размеров и типов микропластика. Кроме того, был применен режим ослабленного полного отражения и проведен дополнительный анализ, такой как сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)-энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС) или рентгеновская компьютерная томография (РКТ). Недавно стал использоваться рамановский спектрометр с более низким пределом обнаружения микропластика, чем у методов анализа на основе инфракрасного излучения.

Однако идентифицировать микропластики на наноуровне по-прежнему сложно из-за ограничений спектроскопического анализа, поэтому предлагается пиролизгазовая хроматография-масс-спектрометрия (Py-GC-MS).

Анализ микропластика в сточных водах. Метод анализа микропластика можно разделить на спектрометрический и термический анализ. Микропластик размером 1–5 мм можно различить невооруженным глазом, а размер в сотни микрон можно проанализировать с помощью оптического микроскопа. ИК-Фурье и рамановская спектроскопия в основном используются для анализа микропластиков размером в десятки микрометров. Термический анализ, такой как Py-GC-MS или термическая экстракция, десорбция, газовая хроматография-масс-спектрометрия (TED-GC-MS), рекомендуется для наноразмерных частиц [43].

По сравнению со спектрометрией, которая анализирует каждую частицу, термический анализ требует большего количества микропластика для достижения предела обнаружения. Спектроскопия требует много времени, поскольку ее необходимо проверить на наличие каждой частицы, подозреваемой в принадлежности к микропластику. Черные пигментированные волокна или прозрачные фрагменты часто недооцениваются, поскольку их невозможно идентифицировать. Они также могут быть переоценены, поскольку частицы немикропластика иногда идентифицируются как микропластики, или частицы микропластика при идентификации распадаются на более мелкие частицы. Чтобы четко отличить микропластик от частиц немикропластика, микропластик либо окрашивали по методу Роуза-Бенгала, либо улучшали процессы идентификации и расщепления, либо использовали отбеливающий реагент для удаления любых органических веществ, прикрепившихся к поверхности микропластика [44].

Размер сетки, используемой для отбора проб, постепенно уменьшается: от сетки, используемой в планктонной сети, используемой для сбора микропластика с большой площади, богатой органическими веществами, до сетки, используемой в фильтре,

используемом для отбора проб для анализа мелкого микропластика. Однако в спектроскопическом анализе, который может подтвердить форму, размер и состав частиц микропластика, частота ложноположительных результатов увеличивалась по мере уменьшения размера частиц. Когда размер частиц микропластика превышал 100 мкм, 83% частиц были визуально идентифицированы как пластиковые с помощью спектроскопии, тогда как процент подтверждения составлял только 63% при размере менее 50 мкм. Волокнистое черное вещество, обнаруженное в реках Рейн и Маас в Нидерландах, было идентифицировано как микропластик под микроскопом, но не было идентифицировано с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье. Типичный размер микропластика для идентификации полимера методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье ослабленного полного отражения составляет (ATR-FTIR) > 500 мкм [45]. Даже успешное извлечение микропластика из пресноводной среды может вызвать трудности в их интерпретации из-за ограничений аналитического оборудования. Из-за этого микропластик мелкого размера может быть недооценен; таким образом, необходимо проявлять осторожность при интерпретации в зависимости от размера микропластика.

4. Состояние пластикового загрязнения водных экосистем Казахстана

В Казахстане было проведено исследование с целью установить наличие микро- и макропластика в высокогорном озере Маркаколь. Цель исследования заключалась в определении пространственного распределения и изменчивости пластикового загрязнения вводной экосистеме озера. Исследование выявило наличие микро- и макропластика в озере и его основных притоках с различной концентрацией в зависимости от места отбора проб. Исследование показало, что концентрация микропластика в озере Маркаколь различается в разных зонах. В акватории озера общая концентрация микропластика составила 837,4 мкг/м³. Концентрации микропластика размером менее 0,315 мм установлены на разных участках озера до 520,8 мкг/м³ и 113,0 мкг/м³. Кроме того, исследование выявило высокие концентрации микропластика в притоках озера с общей концентрацией 150 мкг/м³. Размеры пластикового мусора, обнаруженного как в речных водах, так и в акватории озера, варьировали от мезопластического мусора до частиц микропластика, полимерный состав представлен ПЭТ, ПЭ-ВД, ПЭБД, ПП и ПС. Исследование также показало наличие пластикового загрязнения, вызванного местной деятельностью человека, такой как рыболовство, туризм и неправильное удаление отходов. Кроме того, в статье подчеркивается важность анализа микропластика в водоемах для понимания его воздействия на водную среду и потенциального влияния на здоровье человека [46].

Исследование Баймуканова М. и соавторов было посвящено оценке воздействия пластикового загрязнения на биоразнообразие и экологию Каспийского моря в Казахстане. В ходе исследования были обнаружены различные виды микропластика и другие артефакты на береговой линии и побережье Каспийского моря, что указывает на новый тип загрязнения в этом районе. Наличие микропластика представляет угрозу для морских животных и может привести к накоплению загрязняющих веществ в пищевой цепи. В статье подчеркивается необходимость принятия мер по снижению пластикового загрязнения и защите морской экосистемы. Исследование пластикового загрязнения Каспийского моря выявило несколько конкретных выводов: на береговой линии и побережье Каспийского моря впервые обнаружены различные виды микропластика и другие микро- и макроартефакты; на побережье мыса Тупкараган обнаружены рыболовные сети из синтетических полимерных материалов, полиэтиленовые пакеты, пластиковые бутылки и другие твердые бытовые отходы [47].

Результаты этих исследований могут быть использованы для более масштабных проектов по борьбе с загрязнением микропластиком.

5. Рекомендации по сокращению потребления пластика

Пресная вода, ближайшая к суше, в первую очередь подвергается воздействию наземных отходов, в то время как сточные воды являются результатом антропогенной деятельности, а морская вода подвергается воздействию морской промышленности и является конечным пунктом назначения внутренних вод. Поэтому любая водная среда важна. Ежедневно образуется большое количество пластиковых отходов, которые сбрасываются в водную среду без адекватных процессов переработки отходов. Характеристики сбрасываемых пластиковых отходов зависят от антропогенной деятельности окружающей территории и факторов окружающей среды. Пластмассы, попадающие в окружающую среду, не находятся в промышленном виде, а обычно подвергаются коррозии и фрагментации под воздействием факторов окружающей среды. Состаренный микропластик поглощает высокие концентрации органических химикатов. Поэтому оценку токсичности следует проводить с использованием состаренного микропластика, а не промышленного пластика. Необходима дополнительная оценка токсичности вредных веществ, таких как тяжелые металлы и СО₂, которые легко адсорбируются старым микропластиком. Одним из наиболее существенных ограничений исследований микропластика является отсутствие исследований пластиковых отходов в отложениях.

Согласно отчету ЮНЕП, сумма пластиковых отходов, обнаруженных на пляжах и плавающих в воде, составляет ~30%, тогда как большая часть морских отходов, 70%, оседает в отложениях [48]. Морские отходы, попадающие в осадок, сложно утилизиро-

вать, и они представляют угрозу для морских экосистем, поскольку потенциально токсичны. В частности, бентосные виды могут легко проглатывать пластиковые отходы, найденные на морском дне. Когда происходит изменение океанского течения или погодное явление, происходит вертикальное перемешивание слоя морской воды, а пластиковые отходы высвобождаются и перемещаются.

Поскольку водные системы являются конечным пунктом назначения микропластика, необходимо регулировать различные отрасли промышленности и все виды пластиковых изделий, производимых и сбрасываемых на землю, чтобы предотвратить увеличение количества пластиковых отходов в водных системах. Существует необходимость в эффективном управлении отходами и улучшении дренажных систем на суше. Эту проблему невозможно решить путем регулирования одной или двух стран, но глобальная коалиция и регулирование станут отличным началом решения проблемы. Кроме того, для каждой водной среды должна быть разработана технология удаления микропластика.

Факторы, влияющие на численность и распространение микропластика в водных средах, можно разделить на два типа. Это присущие микропластику свойства, такие как гидрофобность, удельный вес и размер, а также факторы окружающей среды, такие как биологические взаимодействия в водной среде, метеорологические явления и промышленные объекты вблизи водной системы.

Пластиковые отходы, которые уже были выброшены в окружающую среду, продолжают разлагаться и угрожать жизни на Земле. Чтобы предотвратить дальнейшее ухудшение ситуации, необходимо разработать комплексную систему управления отходами, чтобы остановить безрассудный сброс отходов в окружающую среду. Для точных исследований микропластика необходимо сначала определить методы сбора проб и предварительной обработки; затем необходимо разработать метод идентификации микропластика на наноуровне. Необходимо изучить оценку токсичности микропластика и связанных с ним загрязнителей, а также всех факторов окружающей среды, которые могут повлиять на микропластик. Наконец, необходимо исследовать поведение микропластика, контролировать путь его попадания в организм человека и минимизировать концентрацию микропластика, которая может попасть в организм человека. Если пластиковые отходы невозможно реально контролировать, предлагается провести исследования допустимого количества микропластика в организме человека без ущерба для здоровья человека.

В 2019 году Европейское агентство по химическим веществам предложило запретить добавлять микропластик в косметику, бытовую химию, краски и другую продукцию. Пока этот законопроект еще находится в стадии обсуждения. В США запрещено производить косметику и бытовую химию с микро-

пластиком с 2017 года, а продавать – с 2018 года. Аналогичный запрет действует в Нидерландах, Южной Корее, Канаде, Франции, на Тайвани, в Великобритании, Швеции, Италии, Индии, Таиланде, Ирландии, Аргентине, Китае и Новой Зеландии. По данным Европейского химического агентства, в Европе ежегодно в окружающую среду попадает около 42 тыс. т микропластика, который специально добавлялся в различные материалы, и еще около 176 тыс. т случайно образованных полимерных частиц.

Еврокомиссия уже работает над законом о введении мер по сокращению микропластикового загрязнения окружающей среды на 30% к 2030 году.

Во многих странах приняты законы и конвенции об уменьшения использования пластика:

- Европа:
 - *Европейский союз*: Директива 2019/904 об одноразовых пластиковых изделиях.
 - *Франция*: Закон о запрете одноразовых пластиковых изделий.
 - *Германия*: Закон об упаковке.
 - *Великобритания*: Закон об окружающей среде.
- Азия:
 - *Китай*: Закон о защите окружающей среды.
 - *Индия*: Закон об управлении пластиковыми отходами.
 - *Япония*: Закон о переработке ресурсов.
 - *Южная Корея*: Закон об управлении отходами.
- Африка:
 - *Кения*: Закон о запрете одноразовых пластиковых пакетов.
 - *Руанда*: Закон о запрете одноразовых пластиковых пакетов.
 - *Танзания*: Закон о запрете одноразовых пластиковых пакетов.
- Америка:
 - *Канада*: Закон о защите окружающей среды.
 - *США*: Закон о сохранении и восстановлении ресурсов.
- Океания:
 - *Австралия*: Закон об охране окружающей среды и сохранении биоразнообразия.
 - *Новая Зеландия*: Закон об управлении отходами.

Существует необходимость в эффективном управлении отходами и предлагаются следующие меры смягчения загрязнения микропластиком:

– *Сокращение использования пластика*: уменьшение использования одноразовых пластиковых изделий, таких как пакеты, соломинки, столовые приборы и т. д.; поощрение использования многоразовых альтернатив, таких как тканевые сумки, металлические соломинки и т. д.; увеличение использования биоразлагаемых и компостируемых пластиковых изделий; разработка инновационных материалов, которые могут заменить пластик.

– *Улучшение системы сбора и переработки пластика*: увеличение количества пунктов сбора пластиковых отходов; повышение эффективности переработки пластика; разработка новых технологий переработки пластика; поощрение использования переработанного пластика в производстве новых продуктов.

– *Предотвращение попадания пластика в окружающую среду*: установка фильтров на сточных водах, чтобы предотвратить попадание микропластика в водоемы; уборка пластиковых отходов с пляжей, рек и океанов; проведение образовательных кампаний, чтобы повысить осведомленность о проблеме загрязнения микропластиком.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этом обзоре обобщаются данные о распространении и распределении микропластика в воде, основанные на недавних и высоко оцененных публикациях. Кроме того, подробно рассматриваются факторы окружающей среды, влияющие на микропластик, и его токсическое воздействие.

Несмотря на многочисленные исследования микропластика в водных системах, существует пробел в изучении микропластика размером менее 1,5 мкм. Это частично связано с ограничениями аналитических методов и неадекватным контролем за потерей микропластика во время отбора проб и предварительной обработки. Кроме того, отсутствие стандартизированных методов отбора проб и предварительной обработки для анализа микропластика затрудняет сравнение результатов исследований. Тем не менее, имеющиеся исследования выявили факторы окружающей среды, которые могут влиять на микропластик, и определили направления для будущих исследований.

Исследования в Казахстане показали наличие микро- и макропластика в высокогорном озере Маркаколь и Каспийском море. Эти исследования выявили пространственное распределение и изменчивость пластикового загрязнения в водных экосистемах. Результаты этих исследований подчеркивают важность изучения микропластика в водных экосистемах для понимания его воздействия на окружающую среду и потенциального влияния на здоровье человека.

Необходима систематизация результатов исследований путем стандартизации методов анализа микропластика и разработки технологий для анализа пластика на микро- и наноуровне. Исследования токсичности микропластика в окружающей среде остаются ограниченными.

Требуются исследования микропластика, свойства которого изменились из-за старения и загрязнений, прикрепленных к нему. Поскольку микропластик легко изменяется под воздействием окружающей среды, необходим постоянный мониторинг, а не разовый отбор проб. Особое внимание следует уделить совершенствованию методов управления и переработки пластиковых отходов.

Благодарности

Работа проводилась при грантовом финансировании Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан. ИРН AP14869499-2022-2024 гг.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L., Production, use, and fate of all plastics ever made // *Science Advances*, – 2017. 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
2. Plastic Europe, 2020. *Plastics – the Facts 2020*. Plastic Europe. Poole, M.A., O'Farrell, P.N., 1971. The assumptions of the linear regression model. *Trans. Inst. Br. Geogr.* 52, 145. <https://doi.org/10.2307/621706>
3. Lord R., *Plastics and Sustainability: A Valuation of Environmental Benefits, Costs and Opportunities for Continuous Improvement*, <https://www.plasticpackagingfacts.org/wp-content/uploads/2016/11/ACC-report-July-2016.pdf>, accessed December 13, 2020
4. Garside M., *Global Plastic Production 1950–2018*, accessed October 9, 2020. <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950>
5. Sedlak, D. L., Three lessons for the microplastics voyage // *Environ. Sci. Technol.* – 2017, 51 (14), 7747–7748. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b03340>
6. Hartmann N.B.; Hüffer T.; Thompson R.C.; Hassellöv M.; Verschoor A.; Daugaard A. E.; Rist S.; Karlsson T.; Brennholt Matthew Cole M.; Herrling M. P.; Hess M. C.; Ivleva N. P.; Lusher A. L.; Wagner M., Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris // *Environ. Sci. Technol.* – 2019, 53 (3), 1039–1047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>
7. Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling // *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179–199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>
8. Horodytska O, Cabanes A, Fullana A (2019) Plastic waste management: current status and weaknesses // *Plastics in the Aquatic Environment – Part I*. – P. 289–306. https://doi.org/10.1007/698_2019_408
9. Eriksen, M. (2014, December 10). Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea // *PLOS ONE*. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0111913>
10. Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borrorro, J. C., Galgani, F., Ryan, P. G., & Reisser, J. (2014). Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea // *PLoS ONE*, 9(12), e111913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
11. Duis, K., & Coors, A. (2016). Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects // *Environmental Sciences Europe*, 28(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0069-y>
12. Eerkes-Medrano, D., Thompson, R. C., & Aldridge, D. C. (2015). Microplastics in freshwater systems: A review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs // *Water Research*, 75, 63–82. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.012>
13. Hernandez, L. M., Yousefi, N., & Tufenkji, N. (2017). Are There Nanoplastics in Your Personal Care Products? // *Environmental Science & Technology Letters*, 4(7), 280–285. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00187>
14. Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., & Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities // *Science of the Total Environment*, 586, 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
15. Law, K. L., & Thompson, R. C. (2014). Microplastics in the seas // *Science*, 345(6193), 144–145. <https://doi.org/10.1126/science.1254065>
16. Van Cauwenberghe, L., Devriese, L., Galgani, F., Robbens, J., & Janssen, C. R. (2015). Microplastics in sediments: A review of techniques, occurrence and effects // *Marine Environmental Research*, 111, 5–17. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.06.007>
17. Verster, C., Minnaar, K., & Bouwman, H. (2017). Marine and freshwater microplastic research in South Africa // *Integrated Environmental Assessment and Management*, 13(3), 533–535. <https://doi.org/10.1002/ieam.1900>
18. Wagner, M. (2020, November 13). *Freshwater Microplastics*. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/42902>
19. Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and Human Health: A Micro Issue? // *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6634–6647. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>
20. Microplastics ingested by humans can be found in every organ including the brain, new study finds, By Euronews, Published on 30/08/2023, <https://www.euronews.com/next/2023/08/30/microplastics-could-be-widespread-in-organs-and-impact-behaviour-new-study-suggests>
21. Homin K., Jiyeon K., Seonghyeon J., Junho L., Chaehwi L., Yejoon Y., *Microplastics in water systems: A review of their impacts on the environment and their potential hazards*, Vol. 9, Issue 3, March 2023, e14359. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14359>
22. Barboza L.G.A., Vethaak A.D., Lavorante B.R.B.O., Lundebye A.K., Guilhermino L., *Marine Microplastic Debris: An Emerging Issue for Food Security, Food Safety and Human Health* // *Mar. Pollut. Bull.* 2018,133, 336–348. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.047>
23. Vethaak A. D., Legler J., *Microplastics and Human Health* // *Science* 2021, 371(6530),672–674. <https://doi.org/10.1126/science.abe5041>
24. Murphy F., Ewins C., Carbonnier F., Quinn B., *Waste water Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment* // *Environ. Sci. Technol.* – 2016, 50(11), P. 5800–5808. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05416>
25. Yin J., Ju Y., Qian H., Wang J., Miao X., Zhu Y., Zhou L., Ye L., *Nanoplastics and Microplastics May Be Damaging Our Livers* // *Toxics*. – 2022 Oct; 10(10):586. <https://doi.org/10.3390/toxics10100586>
26. Scheurer M., Bigalke M., *Microplastics in Swiss Floodplain Soils* // *Environ. Sci. Technol.* 2018;52:3591–3598. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06003>
27. Corradini F., Meza P., Eguiluz R., Casado F., Huerta-Lwanga E., Geissen V., *Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge*

- disposal. // *Sci. Total Environ.* – 2019;671:411–420.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.368>
28. Lwanga E.H., Mendoza-Vega J., Quej V.K., Chi J.D.L.A., Del Cid L.S., Chi C., Escalona-Segura G., Gertsen H., Salánki T., Van Der Ploeg M., et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain // *Sci. Rep.* – 2017;7:14071. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14588-2>
 29. Mattsson K., Johnson E.V., Malmendal A., Linse S., Hansson L.-A., Cedervall T., Brain damage and behavioural disorders in fish induced by plastic nanoparticles delivered through the food chain // *Sci. Rep.* – 2017; 7:11452. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10813-0>
 30. Dris R., Gasperi J., Saad M., Mirande C., Tassin B., Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? // *Mar. Pollut. Bull.* – 2016;104:290–293.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.006>
 31. Prata J.C. Airborne microplastics: Consequences to human health? // *Environ. Pollut.* – 2018;234:115–126.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.043>
 32. Gautam R., Jo J., Acharya M., Maharjan A., Lee D., K.C. P.B., Kim C., Kim K., Kim H., Heo Y., Evaluation of potential toxicity of polyethylene microplastics on human derived cell lines // *Sci. Total Environ.* – 2022; 838:156089.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156089>
 33. Kye H., Kim J., Ju S., Lee J., Lim Ch., Yoon Y., Microplastics in water systems: A review of their impacts on the environment and their potential hazards // *Heliyon*, Vol. 9, Issue 3, March 2023,
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14359>
 34. Zhang D., Cui Y., Zhou H., Jin Ch., Yu X., Xu Y., Li Y., Zhang Ch., Microplastic Pollution in Water, Sediment, and Fish from Artificial Reefs Around the Ma'an Archipelago, Shengsi, China 703 // *Science of The Total Environment*, 2020,
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134768>
 35. Bains M., Fossi M.C., Galli M., Caliani I., Campani T., Finoia M.G., Panti C., Abundance and characterization of microplastics in the coastal waters of Tuscany (Italy): the application of the MSFD monitoring protocol in the Mediterranean Sea // *Mar. Pollut. Bull.* 133 (2018) 543–552. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.016>
 36. Gao F., Li J., Hu J., Sui B., Wang Ch., Sun Ch., Li X., Ju P. The seasonal distribution characteristics of microplastics on bathing beaches along the coast of Qingdao, China // *Sci. Total Environ.* 783 (2021), 146969.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146969>
 37. Zhu J., Zhang Q., Li Y., Tan Sh., Kang Zh., Yu X., Lan W., Cai L., Wang J., Shi H., Microplastic pollution in the Maowei Sea, a typical mariculture bay of China // *Sci. Total Environ.* 658 (2019) 62–68.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.192>
 38. Ory N.C., Lehmann A., Javidpour J., Stöhr R., Walls G.L., Clemmesen C., Factors Influencing the Spatial and Temporal Distribution of Microplastics at the Sea Surface – A Year-Long Monitoring Case Study from the Urban Kiel Fjord, Southwest Baltic Sea // *Science of The Total Environment*, 736 (2020), 139493.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139493>
 39. Deng H., Wei R., Luo W., Hu L., Li B., Di Y., Shi H., Microplastic pollution in water and sediment in a textile industrial area, *Environ. Pollut.* 258 (2020), 113658.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113658>
 40. Oni B.A., Ayeni A.O., Agboola O., Oguntade T., Obanla O., Comparing microplastics contaminants in (dry and raining) seasons for Ox- Bow Lake in Yenagoa, Nigeria, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 198 (2020), 110656.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110656>
 41. Ziajahromi S., Drapper D., Hornbuckle A., Rintoul L., Leusch F. D. L., Microplastic pollution in a stormwater floating treatment wetland: detection of tyre particles in sediment // *Sci. Total Environ.* 713 (2020),
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136356>
 42. G. Bordos, B. Urbányi, A. Micsinai, B. Kriszt, Z. Palotai, I. Szabó, Z. Hantosi, S. Szoboszlai, Identification of microplastics in fish ponds and natural freshwater environments of the Carpathian basin, Europe // *Chemosphere* 216 (2019) 110–116.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.110>
 43. Liu F., K. Olesen B., Borregaard A. R., Vollertsen J., Microplastics in urban and highway stormwater retention ponds // *Sci. Total Environ.* 671 (2019) 992–1000.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.416>
 44. Hurley R., Woodward J., Rothwell James J., Microplastics integrating the coastal planktonic community in the inner zone of the Rio de la Plata estuary (South America) // *Environmental Pollution*, Vol. 243, Part A, December 2018, P. 134–142.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.064>
 45. Alfonso M.B., Scordo F., Seitz C., Manstretta G.M.M., Ronda A.C., Arias A.H., Tomba J.P., Silva L.I., Perillo G.M.E., Piccolo M.C., First evidence of microplastics in nine lakes across Patagonia (South America) // *Sci. Total Environ.* 733 (2020),
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139385>
 46. Madibekov A., Ismukhanova L., Sultanbekova B., Zhadi A., Zhumatayev S., Musakulkyzy A., Bolatov K., Madibekova A., Micro- and Macroplastics Pollution in the Aquatic Environment of Markakol Lake Located in the Protected Area on the Mountain Slopes of the Southern Part of the Kazakh Altai Mountains // *Preprints*, 13 September 2023, P. 5–15.
<https://doi.org/10.20944/preprints202309.0851.v1>
 47. Баймуканов М.Т., Баймуканова Ж.М., Иргели, Казахстан о пластиковом загрязнении и потенциальном его воздействии на биоразнообразие каспийского моря // *Новости науки Казахстана.* – № 2 (149). – 2021. – С. 1–5. [Baymukanov M.T., Baymukanova Zh.M., Irgeli, Kazakhstan o plastikovom zagryaznenii i potentsial'nom ego vodeystvii na bioraznoobrazie kaspiskogo morya // *Novosti nauki Kazakhstana.* – No. 2 (149). – 2021. – P. 1–5. (In Russ.)]
 48. Hitchcock J.N., Storm events as key moments of microplastic contamination in aquatic ecosystems // *Sci. Total Environ.* 734 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139436>

ТҰШЫ СУДЫ МИКРОПЛАСТИКАМЕН БАСТАУ: КӨЗДЕР, САЛДАРЛАР
ЖӘНЕ АЗАРТУ СТРАТЕГИЯЛАРЫ (ӘДЕБИ ШОЛУ)

К. Бексейтова^{1,2*}, А. Байменов^{1,2}, У. Жантیکеев¹, Е. Сайлауханұлы¹,
А. В. Есин³, С. Михаловский⁴, С. Азат¹

¹ *Сәтбаев атындағы университет, Алматы, Қазақстан*

² *Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*

³ *Инженерлік факультетінің химиялық инженерия кафедрасы,
Эскишехир техникалық университеті, Эскишехир, Түркия*

⁴ *ANAMAD Ltd, Сассекс инновациялық орталығы ғылыми парк алаңы,
Фалмер, Брайтон, Ұлыбритания*

**Байланыс үшін E-mail: bekalsu@mail.ru*

Тұщы су экожүйелерінде микропластиктердің барлық жерде болуы су өміріне де, адамның әл-ауқатына да үлкен зардаптары бар күрделі экологиялық проблемаға айналды. Бұл жан-жақты шолу тұщы судағы микропластикалық ластанудың көп қырлы мәселесін, оның әртүрлі көздерін, тасымалдау механизмдерін, қоршаған ортаға әсерін, анықтау әдістерін және салдарын азайту стратегияларын зерттейді. Микропластикалық ластанудың қоршаған ортаға тигізетін әсері көп және алуан түрлі, су организмдеріне, қоректік торларға және жалпы биоәртүрлілікке әсер етеді. Сонымен қатар, микропластикалық ластану ластанған тұщы су ресурстарын тұтынумен байланысты ықтимал қауіптерге байланысты адам денсаулығына алаңдаушылық тудырады.

Шолу сонымен қатар гидрологиялық жағдайлар, адам әрекеті және биологиялық өзара әрекеттесу сияқты тұщы су экожүйелеріндегі микропластиктердің көптігі мен таралуына әсер ететін экологиялық факторларды атап көрсетеді. Микропластиктердің тасымалдау жолдары мен тағдыры, соның ішінде тұндыру, адсорбция және биоаккумуляция қарастырылады. Мақала тұщы судағы микропластикалық ластанудың маңызды мәселесін шешу үшін жаһандық хабардарлықтың, зерттеулердің және келісілген әрекеттердің шұғыл қажеттілігін көрсетумен аяқталады.

Түйін сөздер: *микропластиктер, тұщы сулардың ластануы, ластану көздері, қоршаған ортаға әсері.*

FRESHWATER POLLUTION BY MICROPLASTICS: SOURCES, CONSEQUENCES
AND MITIGATION STRATEGIES (LITERATURE REVIEW)

К. Bexeitova^{1,2*}, A. Baimenov^{1,2}, U. Zhantikeev¹, E. Sailauhanuly¹,
A. V. Esin³, S. Mikhailovsky⁴, S. Azat¹

¹ *Satbayev University, Almaty, Kazakhstan*

² *al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

³ *Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
Eskisehir Technical University, Eskişehir, Turkey*

⁴ *ANAMAD Ltd., Sussex Innovation Centre Science Park Square, Falmer, Brighton, UK*

**E-mail for contacts: bekalsu@mail.ru*

The ubiquitous presence of microplastics in freshwater ecosystems has become a serious environmental problem with far-reaching consequences for both aquatic life and human well-being. This comprehensive review examines the multifaceted problem of microplastic pollution in freshwater, delving into its diverse sources, transport mechanisms, environmental impacts, detection methods, and mitigation strategies. The environmental impacts of microplastic pollution are many and varied, affecting aquatic organisms, food webs and biodiversity in general. Additionally, microplastic pollution raises human health concerns due to the potential risks associated with consuming contaminated freshwater resources.

The review also highlights environmental factors that influence the abundance and distribution of microplastics in freshwater ecosystems, such as hydrological conditions, human activities and biological interactions. The transport routes and fate of microplastics, including sedimentation, adsorption and bioaccumulation, are considered. The article concludes by highlighting the urgent need for global awareness, research and coordinated action to address the critical issue of microplastic pollution in freshwater.

Keywords: *microplastics, fresh water pollution, sources, environmental impact.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-45-54>

УДК 29.19.22

СИНТЕЗ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ КЕРАМИК С ВАРИАЦИЕЙ СТЕХИОМЕТРИИ КОМПОНЕНТ КЕРАМИК

**А. Л. Козловский^{1,2}, Д. Б. Боргеков^{1,2*}, Р. И. Шакирзянов²,
А. С. Загребова^{1,2}, А. А. Хаметова², А. Т. Жумажанова^{1,2}**

¹ Астанинский филиал Института ядерной физики, Астана, Казахстан

² Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан

*E-mail для контактов: ainashzhumazhanova@gmail.com

В работе представлены результаты получения многокомпонентных теплозащитных радиационно-стойких керамических материалов на основе соединений $WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2-ZrO_2$ полученные путем механохимического твердофазного синтеза с дальнейшим отжигом при температуре 1000 °С. Введение в структуру допирующих веществ, в виде оксидов металлов, позволяет предотвратить нежелательные структурные изменения керамики, улучшить стойкость и стабильность системы. Выбор синтеза керамик на основе оксида циркония связан с наличием ряда ценных физико-механических свойств вещества, и, как следствие, возможность применения в сфере функциональных материалов для использования в разнообразных технических областях. Процессы фазообразования в многокомпонентных керамиках на основе оксидных тугоплавких соединений (WO_3 , Bi_2O_3 , ZnO , TeO_2 , CeO_2 , ZrO_2) были изучены методами сканирующей электронной микроскопии энергодисперсионным и рентгенофазным методами анализа. Используя совокупность представленных методов, были получены следующие результаты, позволяющие всесторонне охарактеризовать исследуемые образцы, а также установить зависимости влияния вариации используемых оксидов на фазовый состав и морфологические особенности керамик. Анализ морфологических параметров показал, что с увеличением концентрации легирующей примеси формируется более плотная структура агломератов, что связано со спеканием частиц при более высоких концентрациях допанта. Согласно полученным результатам энергодисперсионного анализа установлено, что добавление ZrO_2 приводит к небольшому перераспределению элементов в структуре, так атомное содержание Ce , W , Bi , и Te уменьшилось в 2,58; 3,38; 2,12; 1,91 раз соответственно, а атомное содержание Zn увеличилось в 1,32 раза. Анализ дифрактограмм показал, что исследуемые образцы $WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2-ZrO_2$, характеризуются содержанием $Zn_3(TeO_6)$, $ZnTeO_3$, CeO_2 , Bi_2O_3 , Bi_2WO_6 , $ZnWO_4$, $Ce_5Zr_3O_{16}$, ZnO , $(Zr_{0.98}Ce_{0.02})O_2$ фаз.

Ключевые слова: многокомпонентные керамики, радиационная стойкость, диоксид циркония, твердофазный синтез, фазовый анализ.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день наблюдается постоянный рост различных отраслей промышленности, где возникает необходимость работать в условиях высоких температур. Вследствие этого, одной из актуальных задач является поиск теплозащитных керамик, способных решить проблему защиты от длительных тепловых напряжений при значительных перепадах температур. Так, например, при проектировании ядерных реакторов нового поколения возникает необходимость создания термоизоляционных радиационно-стойких материалов, способных выдерживать высокие температуры. Одним из способов продления срока службы технологического оборудования является создание новых керамических материалов с устойчивостью к высоким температурам [1].

Все больший интерес в исследованиях керамик направлен на разработку радиационно-стойких керамических материалов с высокой термической стойкостью на основе оксидных конструкций, содержащих редкоземельные металлы, такие как W , Bi , Zn , Te , Ce , Zr [2, 3]. Металлы с широкой запрещенной зоной, такие как Zn , W и Ce , рассматриваются как перспективные теплозащитные материалы, защищающие от аг-

рессивных внешних факторов. Так при синтезе керамик состава $WO_3-Bi_2O_3$, нанесенного на оксид графена, наблюдается улучшение термической и радиационной стойкости в среднем на 10–12% [4, 5]. У керамик состава $WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2$ наблюдается большой потенциал в термической стойкости, радиационной устойчивости, а также химической инертности. Однако, возникает необходимость более точечного изучения свойств керамик, исследования структурных и оптических свойств синтезируемых керамик, а также динамики фазовых превращений в зависимости от внешних факторов.

Добавление легирующих примесей в состав исследуемых керамик вносит структурные изменения, необходимые для обеспечения требуемых свойств, даже при больших разностях температур. Среди таких примесей можно выделить оксиды циркония, иттрия, церия, кальция, магния или их комбинации. Одним из перспективных допантов для создания керамик является оксид циркония. Введение оксида циркония в состав керамик дает нам ряд ценных физико-механических свойств: высокая механическая прочность и электропроводность, низкий коэффициент трения, химическая стойкость, биоинертность и явление полиморфизма [6].

Использование метода твердофазного синтеза в данной работе, обусловлено простотой технологического оборудования, небольшой продолжительностью, по сравнению с методом химического осаждения [6] и золь-гель методом синтеза [7], экономичностью процесса и высокой степенью чистоты целевых продуктов, что главным образом сказывается на физико-химических и механических свойствах конечного изделия [8].

Целью данной работы является получение многокомпонентных керамик с теплозащитными и радиационно-стойкими свойствами, с применением метода твердофазного синтеза оксидных керамик WO_3 – Bi_2O_3 – ZnO – TeO_2 – CeO_2 с добавлением допанта ZrO_2 в соотношении к общей массе от 0% до 25%, а также изучение фазового состава исследуемых образцов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Синтез многокомпонентных теплозащитных радиационно-стойких керамик с вариацией стехиометрии компонентов керамик производился с применением метода твердофазного синтеза. За основу (матрицу) были выбраны оксиды тугоплавких металлов WO_3 , Bi_2O_3 , ZnO , TeO_2 , CeO_2 ($T_{плав} = 1473, 817, 1975, 733$ и 2400 °С соответственно); в качестве допанта был выбран оксид циркония (IV) ZrO_2 ($T_{плав}=2700$ °С). Общий вес каждой параллели многокомпонентных теплозащитных радиационно-стойких керамик составил 20 г. Содержание допанта в общей массе составило 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%. В таблице 1 представлены массовые соотношения оксидов в исследуемых образцах, рассчитанные по формуле 1:

$$C_m = \frac{m(X)}{m_{общ}}, \quad (1)$$

где $m(X)$ – масса оксида металла в керамике; $m_{общ}$ – общая масса исследуемого образца.

Таблица 1. Массовые соотношения оксидов в исследуемых образцах с добавлением легирующей примеси

Концентрация элементов, %	Массовые концентрации веществ в образцах, м.д.						
	ZrO_2	WO_3	Bi_2O_3	ZnO	TeO_2	CeO_2	ZrO_2
WO_3 – Bi_2O_3 – ZnO – TeO_2 – CeO_2							
100	0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
95	5	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	5
90	10	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	10
85	15	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,15
80	20	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,2
75	25	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,25

Перемалывание исходных компонентов тугоплавких оксидов осуществлялось с использованием планетарной мельницы PULVERISETTE 6 classic line (Fritsch, Berlin, Germany). Механохимический помол был осуществлен в стакане, изготовленном из карбида вольфрама (WC) с вместимостью 80 мл, с использованием мелющих шаров из карбида вольфрама диа-

метром 10 мм. Соотношение количества мелющих тел и подлежащих перемалыванию компонентов равнялось 2:1. Скорость процесса помола составляла 250 об/мин, а перемалывание проводилось в течение 30 минут.

Для синтеза композитных керамик в качестве реактивов были использованы высокочистые химические вещества Sigma Aldrich (Sigma, USA), чистота которых составляла 99,95%. После механохимического перемалывания в планетарной мельнице полученные образцы были подвергнуты термической обработке путем отжига в муфельной печи SNOL (SNOL/Umega group, Utena, Lithuania) при температуре 1000 °С. В течение 5 часов температура в муфельной печи поднималась на 10 °С в минуту. Образцы остывали после термического отжига в течение 24 часов внутри печи до комнатной температуры, во избежание резких перепадов температур. В результате последующей закалки в муфельной печи полученные образцы спеклись до состояния стекла темно-коричневого цвета. Далее керамики перетирались в агатовой ступке.

Морфологические характеристики были проанализированы с использованием метода растровой электронной микроскопии на микроскопе Hitachi TM3030 (Hitachi, Tokyo, Japan). Распределение элементов в структуре керамики было исследовано с применением метода картирования, осуществленного с использованием приставки XFlash MIN SVE (Bruker, Germany).

Для анализа синтеза керамик была изучена возможность протекания следующих реакций:

- 1: $TeO_2 + ZnO = ZnTeO_3$
- 2: $2TeO_2 + 6ZnO + O_2 = 2Zn_3TeO_6$
- 3: $ZnO + WO_3 = ZnWO_4$
- 4: $Bi_2O_3 + WO_3 = Bi_2WO_6$

Стандартные энтальпии и энтропии реакций для уравнений 1–4 посчитаны на основании табличных данных при стандартных условиях [12] и для продуктов реакции [13], по формуле 2:

$$\Delta H_{x.p.} = \sum \Delta H_{прод.} - \sum \Delta H_{исх.} \quad (2)$$

На основании значений стандартных энтропий образования и энтальпий реакции термодинамическим методом рассчитана энергия Гиббса по уравнению Гиббса-Гельмгольца:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3)$$

Результаты расчетов термодинамических величин для реакций 1–4 представлены в таблице 2. Согласно полученным данным энтальпия химических реакций 1–4 является положительной величиной, что говорит о поглощении тепла системой при осуществлении процесса синтеза (эндотермическая реакция $\Delta H > 0$).

Согласно полученным данным в результате химических реакций происходит возрастание энтропии, в том числе и эндотермических реакций, что показывает нам о возможности протекания реакции при достаточно высоких температурах.

**СИНТЕЗ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ КЕРАМИК
С ВАРИАЦИЕЙ СТЕХИОМЕТРИИ КОМПОНЕНТ КЕРАМИК**

Таблица 2. Термодинамические величины химических реакций

Уравнения реакций	ΔH , кДж/моль	ΔS , Дж/моль·К	ΔG , кДж/моль
$\text{TeO}_2 + \text{ZnO} = \text{ZnTeO}_3$	530,79	443,73	-34,07
$2\text{TeO}_2 + 6\text{ZnO} + \text{O}_2 = 2\text{Zn}_3\text{TeO}_6$	2440,52	776,95	410,17
$\text{ZnO} + \text{WO}_3 = \text{ZnWO}_4$	979,99	585,53	234,61
$\text{Bi}_2\text{O}_3 + \text{WO}_3 = \text{Bi}_2\text{WO}_6$	1222,54	865,76	120,42

Рентгеноструктурный анализ полученных образцов производился с помощью метода порошковой дифракции с использованием рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Advance. Перед регистрацией дифрактограммы образцы измельчались до порошкового состояния и помещались в кювету. Регистрация дифрактограммы выполнялась в геометрии Брегга-Брентано (θ - θ сканирование) при комнатной температуре с вращением столика-держателя образца со скоростью 15 об/мин. Для идентификации фазового

состава применялся метод полуколичественного анализа по корундовым числам в программе DiffracEVA. Рентгеноструктурный анализ для определения параметров кристаллической структуры полученных образцов также выполнялся в программе DiffracEVA.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Морфология поверхности синтезированных образцов была изучена с применением техники растровой электронной микроскопии (РЭМ), что позволило проанализировать морфологические особенности синтезированных композитных керамических материалов в зависимости от изменений компонентов в составе оксидных соединений. На рисунках 1–6 представлены электронные микроснимки и данные картирования элементов на поверхности полученных керамик в зависимости от концентрации легирующей добавки ZrO_2 после термического отжига при температуре 1000°C.

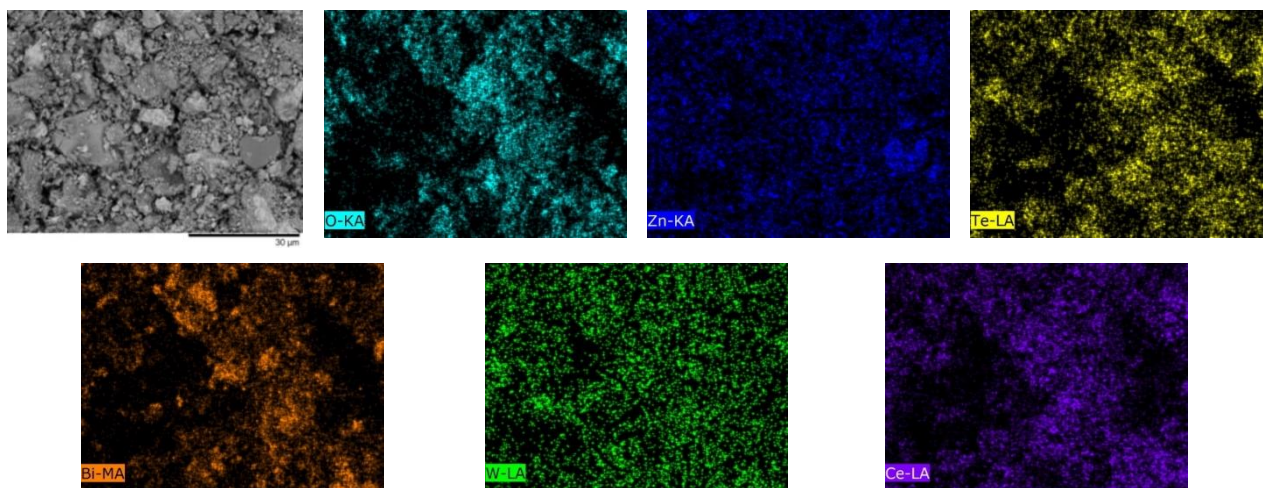


Рисунок 1. Результаты морфологии и данные картирования $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO-TeO}_2\text{-CeO}_2$ керамики

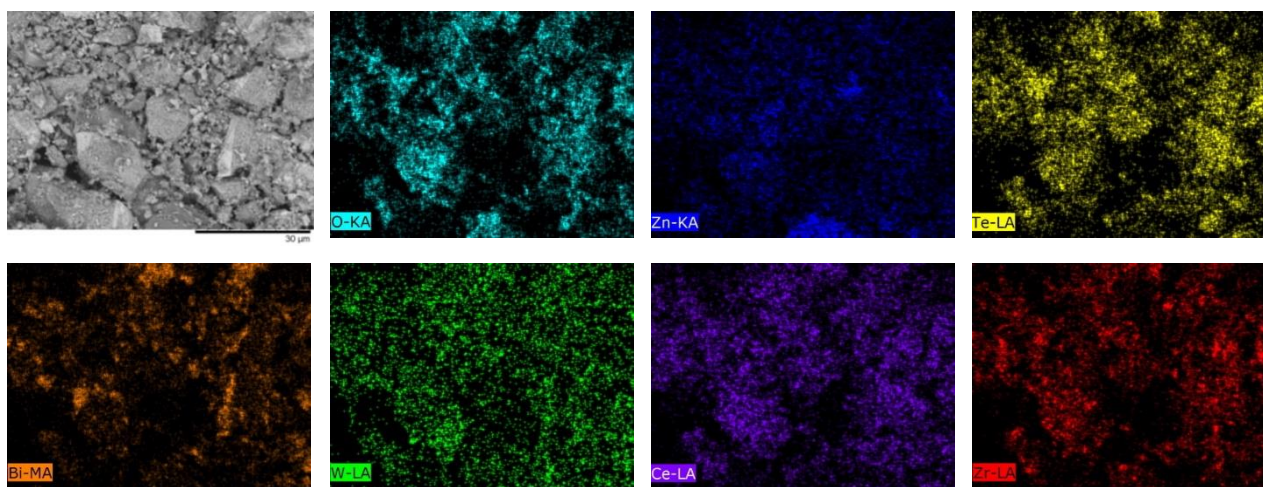


Рисунок 2. Результаты морфологии и данные картирования $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO-TeO}_2\text{-CeO}_2\text{-5\% ZrO}_2$ керамики

По результатам морфологии и данным картирования в качестве основы керамики $WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2$ (рисунок 1), наблюдается равномерное распределение цинка и вольфрама, однако теллур, висмут, церий и кислород распределены неравномерно. Согласно данным картирования в образцах наблюдается скопление кислорода, при этом данный элемент находится в матрицах всех металлов. Содержание большего количества цинка, вольфрама, теллура и церия может быть обусловлено формированием фаз более сложных оксидов данных металлов. Следует отметить неправильную форму и разный размер частицы данной керамики.

В случае, когда в керамиках $WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2$ в качестве допанта используется 5% ZrO_2 , наблюдается изменение распределения элементов, а также переход их в более крупные частицы (рисунок 2), при этом происходит сравнительно равномерное распределение цинка. В то же время теллур, висмут, церий и кислород образуют агломерации в виде неравномерно больших скоплений элементов, очевид-

но формирующие более сложные соединения данных элементов.

При повышении содержания допанта ZrO_2 до 10% равномерного распределения элементов в структуре уже не наблюдается (рисунок 3). Если кислород, теллур и цирконий распределены по одинаковым точкам, остальные элементы уже распределены по всему образцу, что вероятнее всего указывает на образование новых фаз, в составе которых детектируется фаза вольфрама. Размер частиц керамики при этом укрупняется.

По результатам морфологии и данным картирования $WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2$ с 15% ZrO_2 керамики более равномерное распределение наблюдается у элементов цинка и вольфрама (рисунок 4). Следует отметить большое скопление кислорода, циркония и теллура и небольшое количество цинка, что возможно связано с образованием новых фаз, соединений, имеющих в составе оксиды циркония. Происходит формирование более плотной структуры образца керамики.

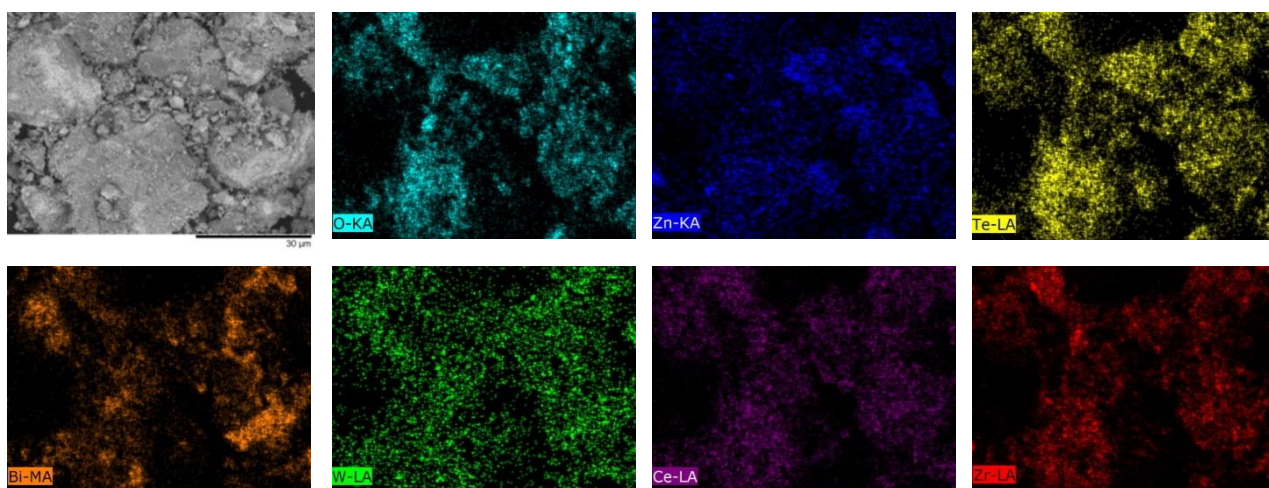


Рисунок 3. Результаты морфологии и данные картирования $WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2 - 10\% ZrO_2$ керамики

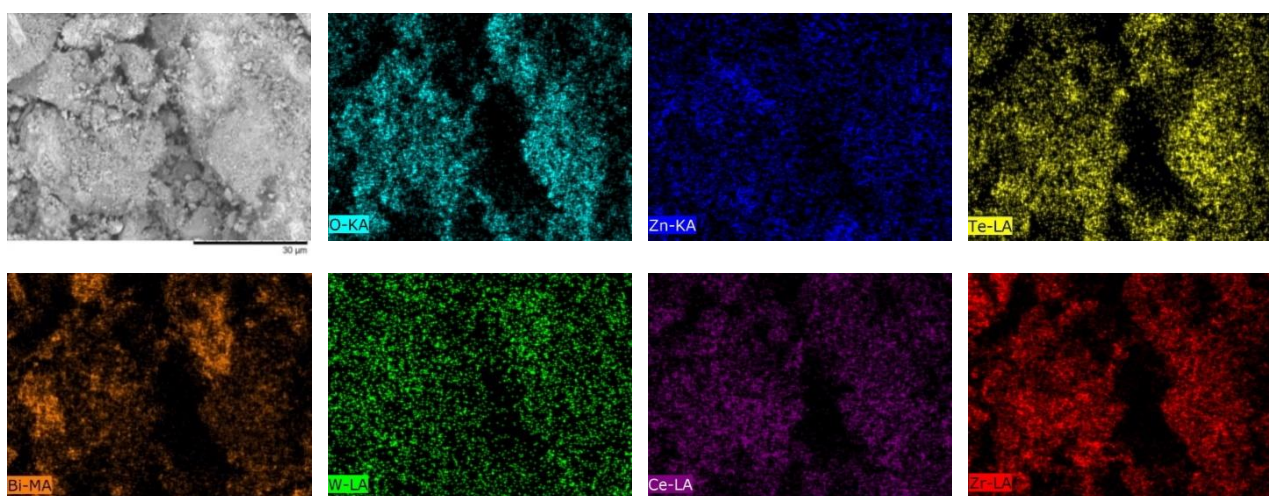


Рисунок 4. Результаты морфологии и данные картирования $WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2 - 15\% ZrO_2$ керамики

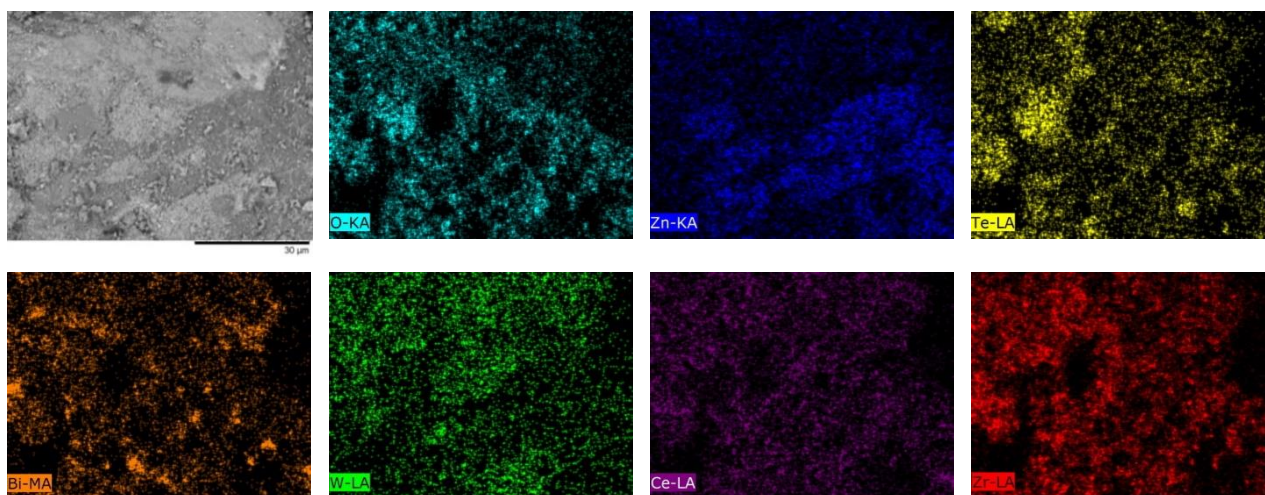


Рисунок 5. Результаты морфологии и данные картирования $WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2-20\% ZrO_2$ керамики

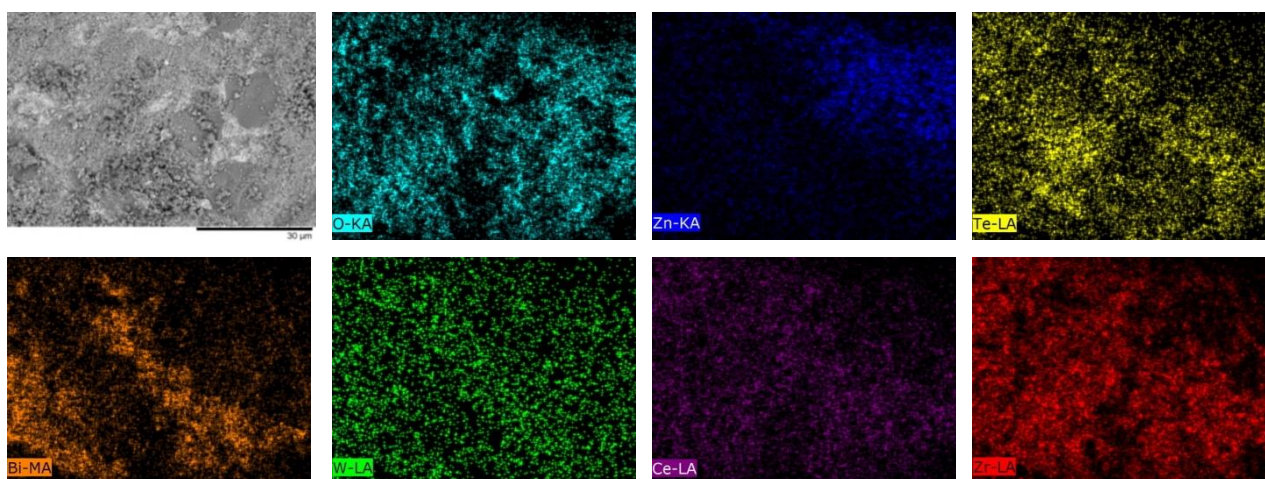


Рисунок 6. Результаты морфологии и данные картирования $WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2-25\% ZrO_2$ керамики

Согласно данным картирования и изучения морфологических особенностей керамик $WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2$ с 20% допированием ZrO_2 керамики наблюдается изменение формы частиц и образование сфероподобных кратеров на картах распределения (рисунок 5). В таких кратерах равномерно распределен вольфрам, а в качестве матрицы выступают кислород, цинк, теллур, висмут, церий, цирконий.

Равномерное распределение вольфрама наблюдается при 25% содержании допанта ZrO_2 в $WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2$ керамике (рисунок 6), при этом визуализируется скопление кислорода, циркония, теллура и церия по одинаковым точкам. Однако висмут и цинк зарегистрирован реже, что указывает на перераспределение элементов в структуре.

Согласно представленным изображениям РЭМ и результатам картирования обнаружено, что при увеличении процента допирования происходит формирование более плотной структуры керамики, переходящей в стеклообразное состояние в результате спе-

кания. Конечная характеристика энергодисперсионного анализа керамик представлены в таблице 3.

Как видно из представленных данных, допирование ZrO_2 приводит к незначительному перераспределению элементов в структуре с увеличением содержания цинка и уменьшением церия, вольфрама, висмута и теллура. Подобные изменения соотношения элементов обусловлены эффектами замещения, характерными для изменений концентраций элементов при их синтезе и последующем термическом отжиге, в случае увеличения концентрации диоксида циркония в составе керамик. При этом сохранение высокой концентрации кислорода в составе керамик (более 50 ат. %) свидетельствует о том, что синтез происходит путем сохранения оксидных форм получаемых соединений, а также с возможным образованием не только простых оксидов, но и более сложных структур по типу шпинели. Согласно данным работ [9, 10] при добавлении в состав $WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2$ соединений диоксида циркония могут иници-

**СИНТЕЗ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ КЕРАМИК
С ВАРИАЦИЕЙ СТЕХИОМЕТРИИ КОМПОНЕНТ КЕРАМИК**

роваться процессы формирования сложных оксидов типа шпинели ABO_4 либо AB_2O_4 , формирование которых происходит за счет изменения энтропии химических реакций. Также при равных концентрациях ZnO и WO_3 при температурах выше $500\text{ }^\circ\text{C}$ происходит формирование фаз вольфраматов цинка ($ZnWO_4$) [11].

Таблица 3. Данные по элементному составу

Эле- мент	Содержание элементов, ат. %					
	исходный	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
Ce	9,94±0,57	8,20±0,47	5,78±0,37	5,94±0,37	4,21±0,30	4,29±0,27
W	6,24±0,57	4,83±0,43	4,24±0,43	4,40±0,43	5,62±0,57	1,50±0,13
Bi	5,53±0,53	5,46±0,53	4,2±0,5	4,40±0,47	1,5±0,2	3,18±0,37
Zn	16,7±0,5	14,47±0,47	13,75±0,47	9,50±0,33	26,09±0,87	9,94±0,30
Te	8,63±0,47	90,50±0,47	7,40±0,43	4,62±0,27	2,44±0,17	6,83±0,40
O	52,95±1,77	53,24±1,67	59,04±2,07	60,72±2,07	49,2±1,8	61,71±3,80
Zr	—	4,74±0,23	5,60±0,33	10,42±0,53	10,94±0,6	12,55±0,63

Для подтверждения данных предположений был проведен рентгенофазовый анализ полученных керамик. Использование данного метода позволяет проанализировать полученные дифрактограммы и сопо-

ставить их со значениями из базы данных, что в свою очередь обеспечивает возможность определения кинетики формирования фаз. Дифрактограммы образцов $(WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2)_{(1-x)} \cdot (ZrO_2)_x$ представлены на рисунке 7.

Анализ дифрактограмм показал, что исходный образец $WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2$, который не содержит ZrO_2 , характеризуется преимущественным содержанием моноклинной фазы $Zn_3(TeO_6)$ (пространственная группа симметрий $C2/c$ (15)) и орторомбической фазы $ZnTeO_3$ (пространственная группа симметрий $Pbca$ (61)), содержание которых составляет 30,0% и 29,0% соответственно. Эти фазы имели наибольшую массовую концентрацию и во всех образцах рассматриваемой экспериментальной серии. На необработанных дифрактограммах отчетливо наблюдаются выраженные пики кубической фазы CeO_2 , поскольку кубическая сингония характеризуется наивысшей симметрией, что увеличивает интенсивность дифракции рентгеновских лучей.

Результаты фазового анализа (рисунок 8) полученные методом полуколичественного анализа по корундовым числам в программе DiffracEVA.

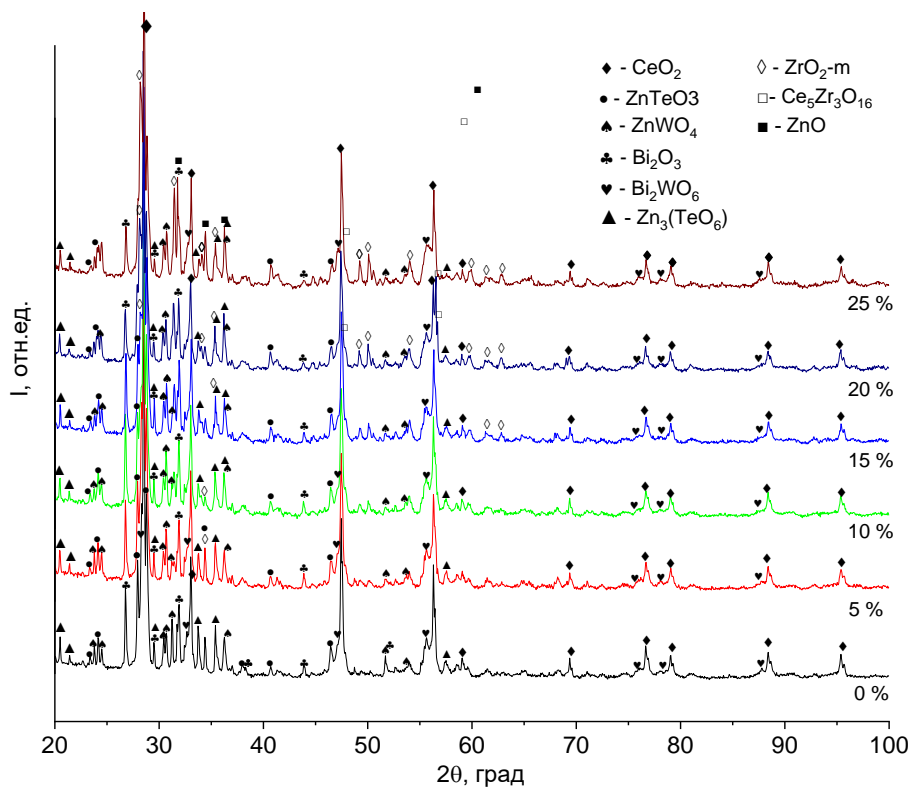


Рисунок 7. Рентгеновские дифрактограммы образцов $(WO_3-Bi_2O_3-ZnO-TeO_2-CeO_2)_{(1-x)} \cdot (ZrO_2)_x$

**СИНТЕЗ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ КЕРАМИК
С ВАРИАЦИЕЙ СТЕХИОМЕТРИИ КОМПОНЕНТ КЕРАМИК**

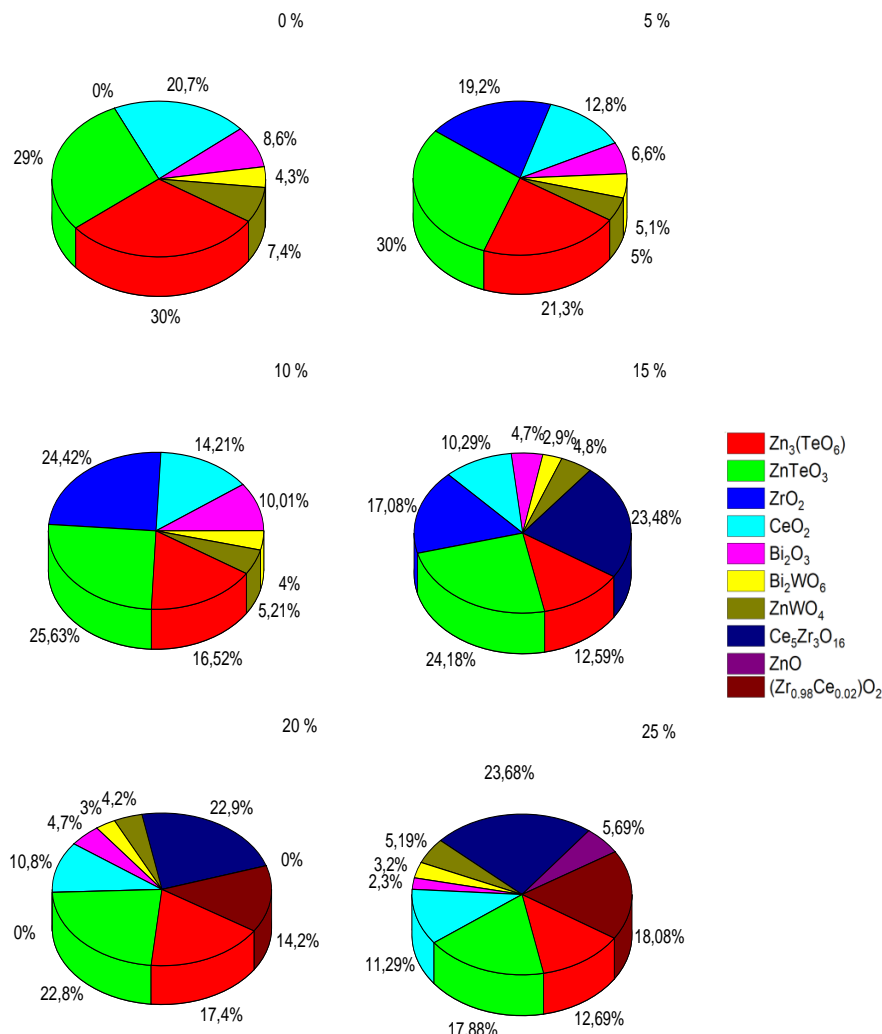


Рисунок 8. Фазовые диаграммы образцов, допированных ZrO₂, %

На рисунке 9 представлены результаты оценки степени кристалличности образцов керамик в зависимости от процентного содержания ZrO₂. Данные степени кристалличности показывают структурные изменения, а именно, соотношение аморфной и кристаллической фазы в образцах керамик. После термического отжига синтезируемые керамики состава (WO₃-Bi₂O₃-ZnO-TeO₂-CeO₂)_(1-x)·(ZrO₂)_x показывают высокую степень кристалличности от 79,9 до 83,7%.

Расчетная степень кристалличности для недопированного ZrO₂ образца составила 82,4%, что указывает на образование 17,6% стеклофазы. Из фазового состава исходного образца, без содержания допанта, можно сделать вывод, что наибольшую реакционную способность проявляют оксиды WO₃, TeO₂, ZnO, так как после термического спекания именно данные оксиды образовали новые соединения Zn₃(TeO₆), ZnTeO₃, Bi₂WO₆, ZnWO₄ и не остались в исходном виде.

Установлено, что добавление в состав керамики (WO₃-Bi₂O₃-ZnO-TeO₂-CeO₂)_(1-x)·(ZrO₂)_x 5 и 10% ZrO₂, приводит к появлению в дифрактограммах рефлексов моноклинной фазы ZrO₂ (пространственная группа симметрии P21/a), содержание которой составляет не менее 19% и уменьшению содержания основных фаз Zn₃(TeO₆) и ZnTeO₃, что приводит к снижению кристалличности образца допированного 10% ZrO₂ до 79,9%. Увеличение процентного содержания оксида циркония к общей массе керамики привело к изменению кристаллической решетки, тем самым нарушился дальний порядок, что привело к росту доли аморфной фазы.

При дальнейшем повышении ZrO₂ до 15–25% на дифрактограммах появляются пики, характерные для триклинной фазы Ce₅Zr₃O₁₆ и моноклинной фазы (Zr_{0.98}Ce_{0.02})O₂. Образование данных фаз после добавления оксида циркония в состав шихты, указывает на фазовые превращения в бинарной системе CeO₂-ZrO₂ при термическом спекании. Этот процесс, в свою очередь, может быть связан с образованием

твердого раствора замещения оксидов церия и циркония. Хорошо известно, что CeO_2 и ZrO_2 образуют твердые растворы замещения в широких пределах концентраций, а CeO_2 является стабилизатором тетрагональной фазы ZrO_2 . Также обнаружено, что вследствие снижения концентрации в шихте ZnO и TeO_2 наблюдается значительное снижение доли основных фаз $\text{Zn}_3(\text{TeO}_6)$ и ZnTeO_3 . По расчетным значениям кристалличности для полученных керамик наблюдается тенденция к уменьшению кристалличности с увеличением доли ZrO_2 в шихте.

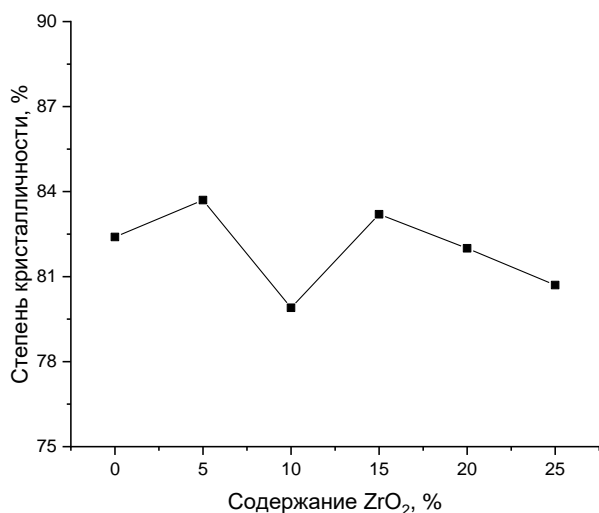


Рисунок 9. Изменение степени кристалличности керамик

Из результатов рентгеноструктурного анализа видно, что добавление оксида циркония не приводит к изменению параметра решетки основных фаз, составляющих экспериментальные образцы. Более того, положения рефлексов в экспериментальной дифрактограмме хорошо совпадают с положением рефлексов штрих диаграмм в карточках PDF, что говорит об отсутствии частичного замещения катионов в образовавшихся оксидах. В совокупности анализ результатов рентгеновской дифракции показывает, что образования многокомпонентного твердого раствора фаз $\text{WO}_3\text{--Bi}_2\text{O}_3\text{--ZnO--TeO}_2\text{--CeO}_2\text{--ZrO}_2$ не наблюдается. Полученные образцы можно рассматривать как матрицу из стеклофазы с включениями из $\text{Zn}_3(\text{TeO}_6)$, ZnTeO_3 , CeO_2 , ZrO_2 и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С применением метода механохимического твердофазного синтеза при последующем отжиге были получены многокомпонентные керамические материалы на основе тугоплавких оксидных соединений (WO_3 , Bi_2O_3 , ZnO , TeO_2 , CeO_2 , ZrO_2). На основании рентгенофазового анализа установлена динамика фазовых трансформаций, заключающаяся в формировании рефлексов моноклинной фазы ZrO_2 (пространственная группа симметрии $P21/a$) с содержанием не менее 19%, а также к уменьшению доли основных фаз $\text{Zn}_3(\text{TeO}_6)$ и ZnTeO_3 . При дальнейшем увеличе-

нии содержания допанта до 0,15–0,25 м.д. наблюдаются пики, характерные для триклинной фазы $\text{Ce}_5\text{Zr}_3\text{O}_{16}$ и моноклинной фазы $(\text{Zr}_{0,98}\text{Ce}_{0,02})\text{O}_2$ на дифрактограммах. Образование указанных фаз после добавления оксида циркония в состав шихты свидетельствует о фазовых превращениях в бинарной системе $\text{CeO}_2\text{--ZrO}_2$ при термическом спекании. Также отмечено, что уменьшение концентрации оксидов ZnO и TeO_2 в шихте сопровождается существенным уменьшением доли основных фаз $\text{Zn}_3(\text{TeO}_6)$ и ZnTeO_3 .

Результаты исследования могут быть использованы при создании защитных элементов, способных работать в экстремальных условиях, таких как агрессивные среды, высокие температуры, механическое давление в процессе эксплуатации, радиационное облучение. Основным преимуществом керамик, исследуемых в работе, являются высокая механическая прочность, электропроводность, низкий коэффициент трения, химическая стойкость и биоинертность. Таким образом, полученные керамики, планируется изучить на возможность применения в ядерных реакторах в качестве защитных элементов с высокими жаростойкими прочностными характеристиками.

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (No. BR21882390).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Gao X. et al. Composition design and preparation of lithium lead titanate ($\text{Li}_2\text{Pb}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$, $0.1 < x < 0.9$): A novel tritium breeding ceramic // *Nuclear Materials and Energy*. – 2024. – P. 101608.
- Çağlar İ. et al. Gamma radiation shielding properties of some binary tellurite glasses // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2021. – Vol. 574. – P. 121139.
- Zeng S. et al. Enhanced thermal shock resistance of zirconia ceramics with multi-component rare earth and tourmaline addition // *Ceramics International*. – 2023. – Vol. 49. – No. 11. – P. 18689-18698.
- Singh G. P. et al. Impact of TiO_2 on radiation shielding competencies and structural, physical and optical properties of $\text{CeO}_2\text{--PbO--B}_2\text{O}_3$ glasses // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2021. – Vol. 885. – P. 160939.
- Abdolahzadeh T. et al. Novel polyethylene/tungsten oxide/bismuth trioxide/barium sulfate/graphene oxide nanocomposites for shielding against X-ray radiations // *International Journal of Radiation Research*. – 2023. – Vol. 21. – No. 1. – P. 79–87.
- Horti N. C. et al. Structural and optical properties of zirconium oxide (ZrO_2) nanoparticles: effect of calcination temperature // *Nano Express*. – 2020. – Vol. 1. – No. 1. – P. 010022.
- Uribe López M. C. et al. Synthesis and characterization of ZnO--ZrO_2 nanocomposites for photocatalytic degradation and mineralization of phenol // *Journal of Nanomaterials*. – 2019. – Vol. 2019. – P. 1-12.
- Кадыржанов, К. и др. Изучение процессов фазовых превращений в многокомпонентных керамиках на основе тугоплавких оксидов Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , WO_3 ,

- Nb_2O_5 // *Вестник КазАТК*. – 2023. – Т. 128. – № 5. – С. 482–492. [Kadyrzhanov, K. i dr. Izuchenie protsessov fazovykh prevrashcheniy v mnogokomponentnykh keramikakh na osnove tugoplavkikh oksidov Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , WO_3 , Nb_2O_5 // *Vestnik KazATK*. – 2023. – Vol. 128. – No. 5. – P. 482–492.) (In Russ.)]
9. Wan S. et al. Phase transformation and electrical properties of Bi_2O_3 -based ZnO varistor doped with WO_3 // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2010. – Vol. 49. – No. 6R. – P. 061102.
10. Lomakin M. S. et al. Pyrochlore phase in the Bi_2O_3 – Fe_2O_3 – WO_3 –(H_2O) system: Physicochemical and hydrodynamic aspects of its production using a microreactor with intensively swirled flows // *Advanced Powder Technology*. – 2023. – Vol. 34. – No. 7. – P. 104053.
11. Ramarao S. D. et al. Structural, morphological and microwave dielectric studies on microwave sintered $ZnWO_4$ ceramic compounds // *Ceramics International*. – 2023. – Vol. 49. – No. 14. – P. 23075–23081.
12. Равдель А.А. и др. Краткий справочник физико-химических величин. Издание девятое / Под ред. А.А. Равдель и А.М. Понаморевоy. – СПб.: Специальная литература. – 1998 – С. 232. [Ravdel' A.A. i dr. Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin. Izdanie devyatoe / Pod red. A.A. Ravdel' i A.M. Ponomorevoy. – SPB.: Spetsial'naya literatura. – 1998 – P. 232.) (In Russ.)]
13. The open quantum materials database: [Электронный ресурс]. URL: <https://oqmd.org>. (Дата обращения: 20.02.2024).

КЕРАМИКА КОМПОНЕНТІНІҢ СТЕХИОМЕТРИЯ ВАРИАЦИЯСЫ БАР ЖЫЛУДАН ҚОРҒАЙТЫН РАДИАЦИЯҒА ТӨЗІМДІ КӨП КОМПОНЕНТТІ КЕРАМИКАНЫҢ СИНТЕЗІ

**А. Л. Козловский^{1,2}, Д. Б. Боргеков^{1,2*}, Р. И. Шакирзянов²,
А. С. Загребова^{1,2}, А. А. Хаметова², А. Т. Жумажанова^{1,2}**

¹ Ядролық физика институтының Астана филиалы, Астана, Қазақстан

² Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

*Байланыс үшін E-mail: ainashzhumazhanova@gmail.com

Жұмыста WO_3 - Bi_2O_3 - ZnO - TeO_2 - CeO_2 - ZrO_2 қосылыстарына негізделген көп компонентті жылудан қорғайтын радиацияға төзімді керамикалық материалдарды механохимиялық қатты фазалы синтез әдісімен, содан кейін $1000\text{ }^\circ\text{C}$ температурада термиялық күйдірумен алу нәтижелері көрсетілген. Құрылымға металл оксидтері түрінде допирлеу заттарын енгізу керамиканың қажетсіз құрылымдық өзгерістерінің алдын алуға, жүйенің беріктігі мен тұрақтылығын жақсартуға мүмкіндік береді. Цирконий оксиді негізіндегі керамика синтезін таңдау заттың бірқатар құнды физика-механикалық қасиеттерінің болуымен және нәтижесінде инженерияның әртүрлі салаларында конструкциялық және функционалды материалдар ретінде қолдану мүмкіндігімен байланысты. Оксидті баяу балкитын қосылыстарға негізделген көп компонентті керамикадағы (WO_3 , Bi_2O_3 , ZnO , TeO_2 , CeO_2 , ZrO_2) фазалық түзілу процесері сканерлеуші электронды микроскопия, энергодисперсиялық және рентген фазалық талдау әдістерімен зерттелді. Ұсынылған әдістердің жиынтығын пайдалана отырып, зерттелетін үлгілерді жан-жақты сипаттауға, сондай-ақ қолданылатын оксидтердің вариациясының керамиканың фазалық құрамы мен морфологиялық ерекшеліктеріне әсерінің тәуелділіктерін анықтауға мүмкіндік беретін келесі нәтижелер алынды. Морфологиялық параметрлерді талдау қоспаның концентрациясының жоғарылауымен агломераттардың тығыз құрылымы пайда болатындығын көрсетті, бұл допанттың жоғары концентрациясында бөлшектердің агломерациясымен байланысты. Алынған энергия дисперсиясын талдау нәтижелеріне сәйкес, ZrO_2 қосылуы құрылымдағы элементтердің аздап қайта бөлінуіне әкелетіні анықталды, сондықтан се, W, Bi және Te атомдық мазмұны сәйкесінше 2,58; 3,38; 2,12; 1,91 есе, ал Zn атомдық мазмұны 1,32 есе өсті. Дифрактограммаларды талдау WO_3 - Bi_2O_3 - ZnO - TeO_2 - CeO_2 - ZrO_2 үлгілері $Zn_3(TeO_6)$, $ZnTeO_3$, CeO_2 , Bi_2O_3 , Bi_2WO_6 , $ZnWO_4$, $Ce_5Zr_3O_{16}$, ZnO , $(Zr_{0.98}Ce_{0.02})O_2$ фазаларының мазмұнымен сипатталатынын көрсетті.

Түйін сөздер: көп компонентті керамикалар, радиацияға төзімділік, цирконий диоксиді, қатты фазалық синтез, фазалық талдау.

**SYNTHESIS OF MULTICOMPONENT HEAT-SHIELDING
RADIATION-RESISTANT CERAMICS WITH VARIATION
OF STOICHIOMETRY OF CERAMIC COMPONENTS**

A. L. Kozlovskiy^{1,2}, **D. B. Borgekov**^{1,2*}, **R. I. Shakirzyanov**²,
A. S. Zagrebova^{1,2}, **A. A. Khametova**², **A. T. Zhumazhanova**^{1,2}

¹ *Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics, Astana, Kazakhstan*

² *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

**E-mail for contacts: ainashzhumazhanova@gmail.com*

The paper presents the results of obtaining multicomponent heat-protective radiation-resistant ceramic materials based on the $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO-TeO}_2\text{-CeO}_2\text{-ZrO}_2$ compounds obtained by mechanochemical solid-phase synthesis with further annealing at a temperature of 1000 °C. The introduction of doping substances into the structure in the form of metal oxides makes it possible to prevent undesirable structural changes in ceramics and improve the durability and stability of the system. The choice of the synthesis of ceramics based on zirconium oxide is associated with the presence of several valuable physical and mechanical properties of the substance, and, as a consequence, the possibility of application in the field of functional materials for use in a variety of technical fields. The processes of phase formation in multicomponent ceramics based on oxide refractory compounds (WO_3 , Bi_2O_3 , ZnO , TeO_2 , CeO_2 , ZrO_2) were studied by scanning electron microscopy, energy dispersive and x-ray phase analysis methods. Using a combination of the presented methods, the following results were obtained, which make it possible to comprehensively characterize the samples under study, as well as establish the dependence of the influence of variations in the oxides used on the phase composition and morphological features of the ceramics. Analysis of morphological parameters showed that with increasing dopant concentration, a denser structure of agglomerates is formed, which is associated with sintering of particles at higher dopant concentrations. According to the obtained results of energy dispersive analysis, it was found that the addition of ZrO_2 results a slight redistribution of elements in the structure, so the atomic content of Ce, W, Bi, and Te decreased by 2.58; 3.38; 2.12; 1.91 times, respectively, and the atomic content of Zn increased by 1.32 times. Analysis of diffraction patterns showed that the studied samples $\text{WO}_3\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO-TeO}_2\text{-CeO}_2\text{-ZrO}_2$ are characterized by the content of $\text{Zn}_3(\text{TeO}_6)$, ZnTeO_3 , CeO_2 , Bi_2O_3 , Bi_2WO_6 , ZnWO_4 , $\text{Ce}_5\text{Zr}_3\text{O}_{16}$, ZnO , $(\text{Zr}_{0.98}\text{Ce}_{0.02})\text{O}_2$ phases.

Keywords: *multicomponent ceramics, radiation resistance, zirconium dioxide, solid-phase synthesis, phase analysis.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-55-62>

УДК 621.039.8

IAEA МЕДИЦИНАЛЫҚ ИЗОТОПТАРЫНЫҢ БРАУЗЕРІН ЙОД-123 ӨНДІРІСІН МОДЕЛЬДЕУ ҮШІН ПАЙДАЛАНУ

С. Н. Мукашева*, Д. А. Мыңжасарова

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

**Байланыс үшін E-mail: snmukasheva@gmail.com*

Бұл жұмыста Атом энергиясы жөніндегі халықаралық агенттіктің медициналық изотоптар браузерін пайдалана отырып, медициналық изотоп өндірісін модельдеу нәтижелері келтірілген. Медициналық изотоптарды өндіруге арналған Web-қосымшасы пайдаланушының деректері негізінде ядролық реакция бойынша қажетті деректерді алуға мүмкіндік береді: нысаналық радионуклид, сәулелендіру бөлшегі немесе сәулелендіру сәулесі, энергия диапазоны, сәулелендіру және салқындату уақыты. Йод-123 изотопын теллур-124-тен алуды модельдеу негізінде кестелік мәндер және ядролық реакцияның көлденең қимасының суреттелген графиктері алынды; изотоптың ыдырау өнімдері ұсынылған. Модельдеу нәтижелерінде гамма-сәуле шығаратын йод-123 радионуклиді үшін берілген ядролық реакция бойынша IAEA ұсынған деректермен салыстыру жүргізілді. Гамма сәулелендіруші радионуклид йод-123 бір фотонды эмиссиялық компьютерлік томографияны жүргізу үшін ең ыңғайлы радионуклидтердің бірі болып табылады. Эксперименттік әдістер болмаған кезде компьютерлік модельдеудің заманауи технологиялары сол саладағы мамандарға проблемаларды шешу үшін әлемдік ғылым мен халықаралық мәліметтер базасының жетістіктерін пайдалануға мүмкіндік береді, бұл жағдайда медициналық изотоптар шығаруда қолдануға болады. Йод-123 өндірісін модельдеу тәсілдерін басқа медициналық изотоптарды алу үшін қолдану ұсынылады.

Түйін сөздер: йод-123, ядролық медицина, медициналық изотоп, көлденең қима, модельдеу.

КІРІСПЕ

Қазіргі заманда медициналық қызмет көрсету үшін радиациялық сәулелер мен радионуклидтерді қолдануға негізделген жоғары технологиялық әдістер қолданылады. Ядролық медицина әдістерін қолдану көптеген аурулардың алдын алудың, диагностикалаудың және емдеудің жаңа, тиімдірек әдістерінің пайда болуына ықпал етеді. Ядролық медицинада альфа, бета, гамма сәулелер шығаратын радионуклидтер көптеген арнайы медициналық зерттеулерде, диагностика және терапияда – жеке мүшелерді визуализациялауда қолданылады [1–4]. Бір фотонды эмиссиялық компьютерлік томографияны жүргізуге арналған ең ыңғайлы радионуклидтердің бірі 1969 жылдан бастап ядролық медицинада қолданылатын гамма-сәуле шығаратын радионуклид йод-123 болып саналады. Йод-123-те 83,4% жоғары өнімділігі бар 159 кэВ γ -сәулелену энергиясы салыстырмалы түрде аз және жартылай ыдырау периоды 13,31 сағ. сондай-ақ, йод-123 спектрде β -сәулеленудің болмауына байланысты йод-131-ге қарағанда қалқанша безді аз дәрежеде зақымдайтыны белгілі, нәтижесінде пациентке тіндердің дозалық жүктемесі де төмендейді. Судағы йод-123 γ -кванттарының жартылай сіңіру қабатының қалыңдығы 4,7 см құрайды, бұл радиометриялық өлшеулер жүргізуге мүмкіндік беретін дене тіндерінде сәулеленудің жақсы енуін қамтамасыз етеді [5–8].

Йод-123 радионуклидін тікелей ^{124}Te және сирек ^{122}Te немесе ^{123}Te нысандарын қолдану арқылы төмен энергиялы жоғары тоқты протон үдеткіштерінде алынады. Бұл ретте ^{123}I -тің радионуклидтік тазалығы ~96%-дан аспайды, негізгі ластану ^{124}I

($T_{1/2} = 4,1$ сут, $E_{\gamma} = 603$ кэВ) береді. Алайда, жоғары байытылған нысандық материалдың қымбаттығына байланысты генераторлық әдісті ^{123}Xe ыдырау негізінде ^{123}I пайда болатын реакцияларда қолдану қолайлы. ^{123}I радионуклидінің жаппай өндірісі үшін кіші және орта өлшемдегі циклотрондарда жоғары байытылған ^{124}Xe -ті энергиясы 30 МэВ дейінгі протондарының нитенсивті сәулелерімен сәулелену әдісі ұсынылады: ($^{124}\text{Xe}\{(p,2n) + (p,pn)\}$). Генераторлық (жанама) әдістің артықшылығы алынған ^{123}I -тің жеткілікті жоғары радионуклидтік тазалыққа ие болуында ($\geq 99,5\%$; $^{125}\text{I} \leq 0,2\%$). Осының арқасында генераторлық препараттар ^{123}I қалқанша безінің ауруларын диагностикалауға ғана емес, сонымен қатар әртүрлі органдардың ауруларын диагностикалауда кеңінен қолдануға қолайлы [5, 9]. ^{124}Xe -тен жоғары таза ^{123}I алу үшін тағы бір әдіс мүмкін, атап айтқанда $^{124}\text{Xe}(\gamma, n)^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$ фотодролық реакциясы. Бұл әдістің салыстырмалы түрде төмен өнімділігіне қарамастан, сызықтық электронды үдеткіштер пайдалану қымбатқа шығатын протондық циклотрондарымен бәсекелесе алады және жеке клиникалар мен аймақтардың қажеттіліктерін қамтамасыз ете алады [5, 9–10].

IAEA (International Atomic Energy Agency) ұйымдастырған зерттеу жобасы шеңберінде бірқатар ядролық реакцияларға зерттеулер жүргізілді, нәтижесінде диагностикалық гамма-сәуле шығаратын радионуклидтер пайда болады. Қозу функциялары түріндегі ядролық реакциялардың көлденең қимасының ұсынылған деректері, сондай-ақ олардың ауытқуларының сандық бағалаулары алынды. Барлық бағаланған сандық нәтижелер мен оларға сәйкес ауытқулар

онлайн режимінде www-nds.iaea.org/medical/gammaemitters.html сайтында, сондай-ақ Атом энергиясы жөніндегі халықаралық агенттіктің/Ядролық деректер секциясының (IAEA-NDS) медициналық порталында www-nds.iaea.org/medportal қол жетімді [12].

Бұл жұмыста біз йод-123 изотопын алу үшін IAEA ұсынған ядролық реакциялар туралы мәліметтерді, сондай-ақ медициналық изотоптар браузерін пайдалана отырып, йод-123 медициналық изотопын өндіруді модельдеу нәтижелерін ұсынамыз (<https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.html>).

ӘДІСТЕР

Бұл жұмыста радиофармацевтикалық зерттеулер мен өнеркәсіпте іргелі ядролық деректерді тікелей пайдалануға арналған IAEA медициналық изотоптарының браузері пайдаланылады [12–13]. Пайдаланушы деректеріне негізделген медициналық изотоптарды өндіруге арналған Web-қосымшасы www-nds.iaea.org/mib сілтемесі арқылы қол жетімді [14]. Йод-123 алудың әртүрлі ядролық реакциялары үшін біз Web-қосымшаның пайдаланушылары ретінде келесі деректерді көрсетеміз:

- нысандық радионуклид (target);
- сәулелендіру бөлшегі немесе сәулелендіру сәулесі (projectile);
- энергия диапазоны;
- сәулелену және салқындату уақыты.

Браузердің бағдарламалық жасақтамасы қажетті изотопты алу нәтижелерін көрнекі және анық түрде бірден шығарады, біздің жағдайда йод-123 изотопы, сондай-ақ қажетсіз жанама өнімдер бойынша алынған мәліметтер негізінде осы изотоптың өндірістік процесінің орындылығы туралы ұсыныстар дайындауға болады.

Браузердің бағдарламалық жасақтамасына енгізілген ядролық реакция нәтижесінде радиоактивті ядроның шығуын есептеу үшін формализмді қысқаша сипаттайық. Изотоптарды өндіруге арналған аналитикалық формулалар [13] келтірілген. Бұл жүйеде нақты жуықталулар қолданылады және олардың негізінде барлық кез-келген жағдайларға негізделген ең қарапайым тендеулер алынады:

– біріншіден, сәулеленудің басында тек бір табиғи элементті қамтитын нысанды сәулелендірудің қарапайым жағдайы қарастырылады;

- таргеттік изотоп радиоактивті емес;
- пайда болған нуклидтер қос сәулеленуге ұшырамайды деп болжанады (сәулелену кезінде нысанның құрамы өзгермейді деп болжауға болады);
- тек негізгі күйге немесе изомерге дейінгі бета-ыдырау ескеріледі, альфа-ыдырау қарастырылмайды;
- протондардың бірнеше рет сәулеленуі нәтижесінде пайда болатын арналарда радиоактивті ыдырау ескерілмейді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Йод-123 алынуын ядролық реакция арқылы модельдейміз:

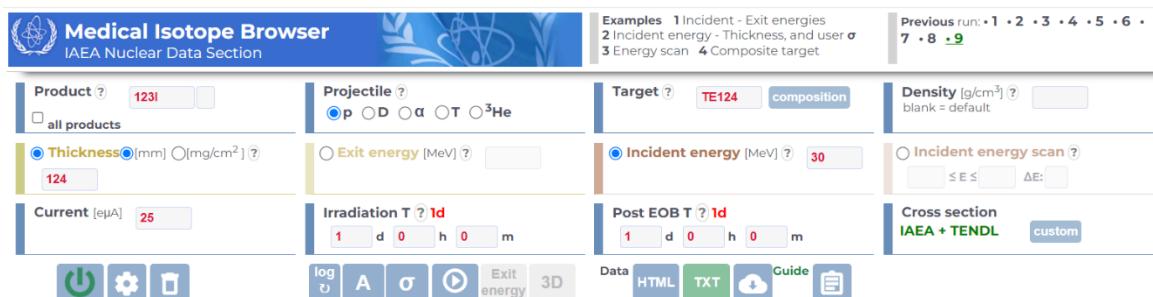


Бұл үдетілген протондардың әсерінен байытылған теллур изотоптық нысандардан йод-123 алудың тікелей ядролық реакциясы. Мұндай реакциялар үшін орташа және төмен қуатты циклотрондарды қолдануға болады [15, 16].

Біз IAEA медициналық изотоптарының браузерін, Web-қосымшаны <https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.html> қолданамыз [14], Web-сайт парағының көрінісі 1-суретте көрсетілген.

Үдетілген протондардың әсерінен теллур-124 нысанынан йод-123 алу үшін берілген модельдік параметрлері төменде келтірілген:

- энергия (Incident energy) реттік 30,000 → 29,728 МэВ;
- максималды сәулелендіру уақыты (Maximal irradiation time): 1 күн;
- салқындату уақыты (Cooling time): 1 күн;
- ток күші (Beam current): 0,025 мА;
- материалдың тығыздығы (Target material density): 6,240 г/см³;
- облыс (Target area): 1,000 см²;
- нысанның эффективті қалыңдығы (Effective target thickness): 0,277 см;
- эффективті толық көлем (Effective target volume): 0,277 см³;
- нысанның эффективті массасы (Effective target mass): 1,731 г;



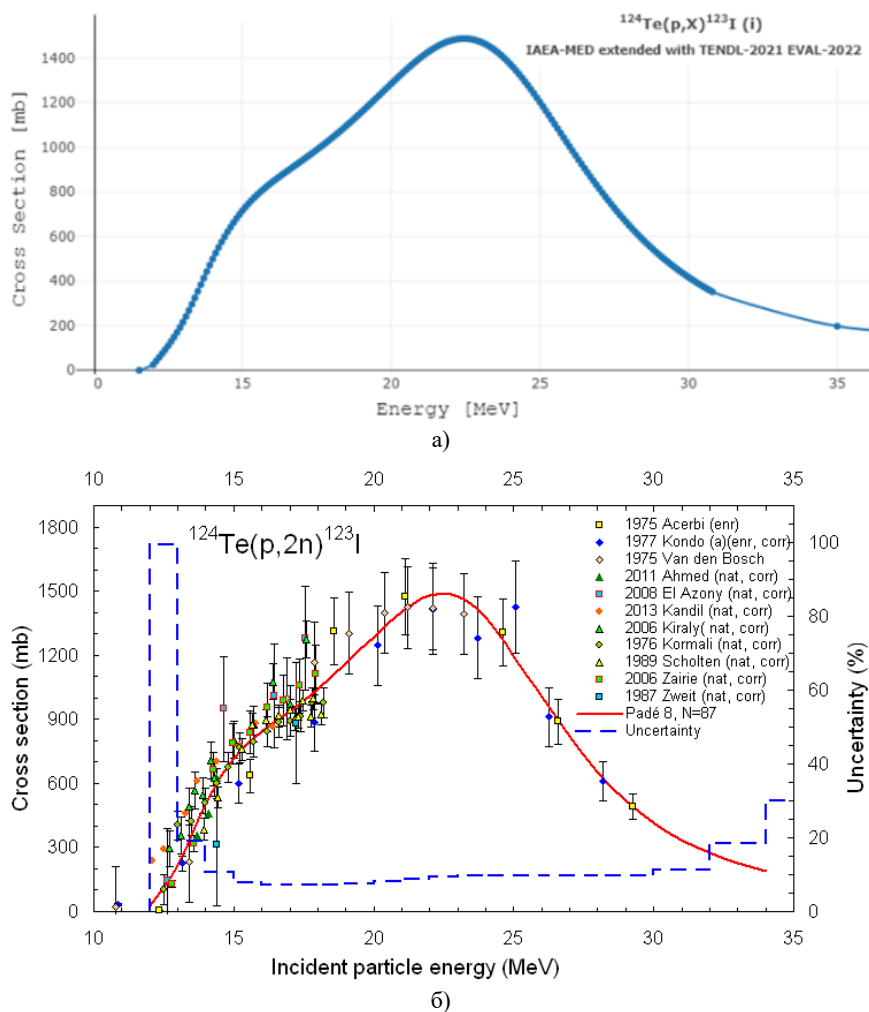
1-сурет. Пайдаланушы деректері негізінде медициналық изотоптарды өндіруге арналған IAEA медициналық изотоптары браузерінің web-парақшасының көрінісі

- нысандық атомдар саны (Number of target atoms): $8,40528 \cdot 10^{21}$;
- түсетін бөлшектердің саны (Number of incident particles): $1,56038 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$;
- нысанда бөлінетін жылу (Produced heat in target): 0,750 кВт.

2-суретте IAEA жобасы шеңберінде алынған (а) модельдік және эксперименттік (б), реакция (1) бойынша теллурдан йод-123 алудың ядролық реакциясының көлденең қималар көрсетілген. Йод-123 ұсынылған көлденең қимасын алу үшін 12 жұмыста (2-суреттегі (б) қызыл сызық) 35 МэВ дейін түсетін бөлшектердің энергиялары үшін эксперименттік көлденең қима деректері қарастырылды [17–28]. Негұрлым дәйекті жиынтықты алу үшін негізінен байытылған нысандарында өлшенген көлденең қималардың мәндеріне сүйену туралы шешім қабылданды Acerbietal. (1975) [17], және табиғи нысандарда зерттеу Kandiletal. (2013) [24], Kiralyetal. (2006) [25]. 2-суреттегі (б) сол жақтағы ось ұсынылған қызыл сызыққа қатысты % ауытқуды көрсетеді. Қалған 11 деректер жиынтығы Pade-дің ең кіші квадраттарына

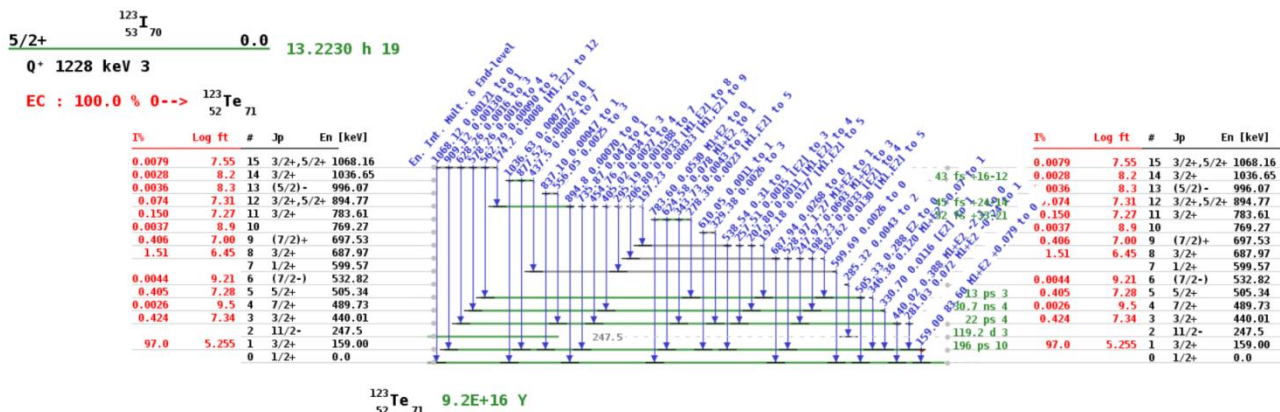
сәйкес келетін кіріс ретінде қарастырылды. 8 параметрі бар Pade функциялары $\chi^2=1,29$ таңдалған 87 деректер нүктесіне сәйкес келді және 28 МэВ-қа дейінгі энергия диапазонын қамтыды. Көрсетілген ауытқулар (4% жүйелі ауытқуларды қоса алғанда) реакция табалдырығына жақын 50%-дан асады, 13 МэВ-тен 25 МэВ-қа дейін 10%-дан төменге дейін тұрақты төмендейді, ал жоғары энергияларда қайтадан 40%-ға дейін артады [11].

2-суреттен (а) көріп отырғаныңыздай, йод-123 көлденең қимасының модельдік мәндері сандық мәндер бойынша 2-суреттегі (б) ұсынылған қызыл сызықпен сәйкес келеді, өйткені модельденген көлденең қима мәндерінің сенімділігі IAEA медициналық изотоптар кітапханасының дәлелденген реакция арналарымен толықтырылған TENDLтолық деректер кітапханасының арқасында анықталады. Медициналық изотоптарды өндіруге арналған Web-қосымшасымен кез-келген изотоп өндірісін болжау үшін қолдана аламыз: ол кеңінен қолданылады және сапалық негізгі деңгейінде мұқият тексерілген. Модельдеу кезінде кестелік мәндерге де қол жетімді.



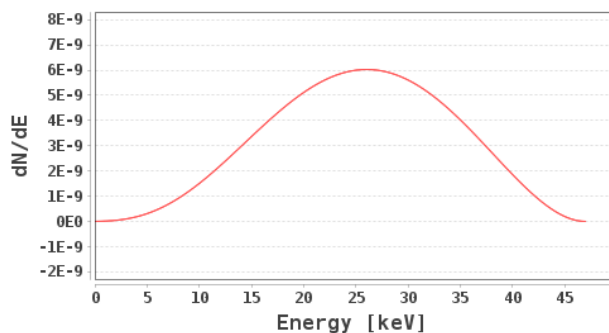
2-сурет. Модельдік (а) <https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.html> және эксперименттік (б) <https://www-nds.iaea.org/medical/te4p23i0.html>, IAEA жобасы шеңберінде алынған

IAEA МЕДИЦИНАЛЫҚ ИЗОТОПТАРЫНЫҢ БРАУЗЕРІН ЙОД-123
ӨНДІРІСІН МОДЕЛЬДЕУ ҮШІН ПАЙДАЛАНУ

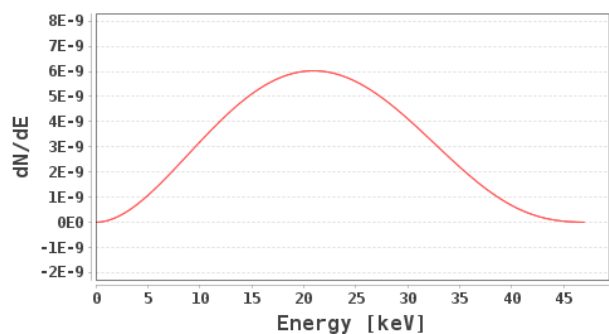


3-сурет. Йод-123 изотопының ыдырауының суреттелген көрінісі <https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.html>

Бұдан әрі веб-портал йод-123 радионуклид туралы иллюстрацияланған ақпарат береді, жартылай ыдырау периоды 13,2235 сағ көрсетіледі, одан соң гамма сәуле шығарумен жүретін 100% изотоп ядролық ыдырау нәтижесінде теллур-123 түзіледі, негізгі гамма энергиясы 158,97 кэВ (83,3%), 3-сурет.



а)



б)

4-сурет. Бета-спектр (а) мен нейтрино спектрінің (б) графикалық көрінісі

Сондай-ақ, көптеген ғылыми мәселелер үшін ыдырау бөлшектерінің спектрлері туралы түсінік болуы керек, бұл қарастырылып отырған жағдайда позитрон мен нейтриноның бөлінуімен жүретін бета-ыдырау. Модельдеу бета-спектр мен нейтрино спектрінің сандық және графикалық бейнелерін алуға мүмкіндік береді (4-сурет). Біздің жағдайда β^+ ыдырауы позитрон мен нейтрино пайда болған кезде

жүреді. 4-суреттен бета-плюс ыдырау спектрі мен нейтрино спектрі осы процесте энергия мен импульстің сақталу заңдарымен өзара байланысты. Ыдырау кезінде бөлінетін энергия позитрон мен нейтрино арасында бөлінеді. Бета плюс спектр графигі әртүрлі позитрондық энергиялардың ықтималдығын, ал нейтрино спектрінің графигі сәйкес нейтринолар үшін энергияның таралуын көрсетеді. Берілген бета ыдырауының энергетикалық сипаттамаларын зерттеу үшінекі спектрді де пайдалануға болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Радионуклидтік терапия көптеген жылдар бойы бүкіл әлемде онкологиялық аурулармен күресудің өзекті бағыттарының бірі болып табылады, ал Қазақстан Республикасы үшін бұл әдісті қолдану ерекше маңызды, өйткені бұл әдісті қолдану онкологиялық ауруларды емдеудің клиникалық практикасына енді ғана еніп жатқан себепті де маңызды болып табылады. Радионуклидті терапияның ерекшелігі жоғары спецификалық және тиімді әсер етуінде және жанама жағымсыз әсерлері минималды деңгейде. Кейбір жағдайларда радионуклидтік терапияның баламасы жоқ [29–30].

Қазіргі уақытта Қазақстан Республикасында ядролық медицинаның 7 орталығы мен бөлімшелері жұмыс істейді, олардың тек біреуінде ғана қалқанша безінің катерлі ісігін емдеуде радионуклидті терапия қолданылады. Алматыда: Қазақ онкология және радиология ғылыми-зерттеу институты, кардиология және ішкі аурулар ғылыми-зерттеу институты, «Орхунмедикал» ЖШС, «Сұңқар» АҚ, «МедИнвестГрупп Қазақстан» ЖШС; Астана қаласында: Республикалық диагностикалық орталық, Президент Әкімшілігінің медициналық орталығының ауруханасы және Семей ядролық медицина және онкология орталығында [29–30].

Бұл жұмыста біз медициналық изотоптар браузерін қолдана отырып, йод-123 медициналық изотопының өндірісін модельдеу нәтижелерін ұсындық (<https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.html>). Біз бұл браузердің мүмкіндіктерін көрсеттік және алынған нәтижелерді әдеби дереккөз-

дермен салыстырдык. Йод-123 изотопы бір фотонды эмиссиялық компьютерлік томографияны жүргізу үшін ең қолайлы радионуклидтердің бірі болып саналады. Сондай-ақ, судағы йод-123 γ -кванттарының жартылай сіңіру қабатының қалыңдығы 4,7 см болатыны белгілі, бұл радиометриялық өлшеулер жүргізуге мүмкіндік беретін дене тіндерінде жақсы сәулелену қабілетін қамтамасыз етеді.

Дамыған интернет ресурстардың заманауи мүмкіндіктері, атап айтқанда, ядролық медицина саласындағы ғалымдардың әлемдік қауымдастығы әзірлеген Web-қосымшалар радиофармацевтикалық зерттеулер мен өнеркәсіпте іргелі ядролық деректерді тікелей пайдалану үшін бірегей мүмкіндік береді.

Йод-123 өндірісін модельдеу тәсілдерін басқа медициналық изотоптарды алу үшін де қолдануға болады, ғылыми қызметкерлер мен мамандарға, сондай-ақ ядролық физика және ядролық медицина саласындағы дипломдық жұмыстарды жазуға ұсынылады.

Бұл жұмыс магистрлік диссертация аясында, 7М05311 Ядролық медицина білім беру бағдарламасы бойынша, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті, теориялық және ядролық физика кафедрасында орындалды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

1. Яверт Н. Излучения и радионуклиды в медицине // Бюллетень МАГАТЭ. –2014. – № 55-4. – С. 5–8. URL: www.iaea.org/bulletin
2. Мадсен М. А. Ясное представление о медицинской визуализации // Бюллетень МАГАТЭ. –2014. – № 55-4. – С. 14-15. URL: www.iaea.org/bulletin
3. Шаназаров Н.А., НалгиеваФ.Х. Основы лучевой терапии: Учеб. Пособие – Нур-Султан, 2021. –100 с.
4. Бажукова И. Н., Бажуков С. И., Баранова А. А. Технологии ядерной медицины: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. – 104 с.
5. Дмитриев С.Н., Зайцева Н.Г. Радионуклиды для биомедицинских исследований. Ядерные данные и методы получения на ускорителях заряженных частиц // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1996. – Т. 27. – Вып. 4. – С. 977–1042.
6. Кодина Г. Е. Химическая технология радиофармацевтических препаратов: учебное пособие / Г. Е. Кодина, М. А. Богородская. – М.: ФГУ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2010. – С. 468–470.
7. Семенов А.С., Скуридин В.С., Головков В.М., Большаков А.М., Гарапацкий А.А., Слепченко Г.Б., Ильина Е.А., Нестеров А.А. Радиофармацевтические препараты на основе радионуклидов йода // Известия ВУЗов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 11/3. – С. 194–201.
8. Семенов А. С. Разработка методов получения радиофармацевтических лекарственных препаратов на основе ^{123}I для медицинской диагностики: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.8 / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2022. – 165 с. URL: <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-metodov-polucheniya-radiofarmatsevticheskikh-lekarstvennykh-preparatov-na-osnove>
9. Веревкин А.А., Стервоедов Н.Г., Ковтун Г.П. Получение и применение короткоживущих и ультракороткоживущих изотопов в медицине // Вестник Харьковско-го университета. – 2006. –Т. 746, Вып. 4(32). – С. 54–64.
10. Кодина Г.Е., Красикова Р.Н. Методы получения радиофармацевтических препаратов и радионуклидных генераторов для ядерной медицины: учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – 282 с.
11. Tarkanyi F. T. et al. Recommended nuclear data for medical radioisotope production: diagnostic gamma emitters // J. Radioanal. Nucl. Chem. –2019. –Vol. 319. – P. 487–531. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6142-4>
12. Medical Isotope Browser IAEA: Gamma Emitters. URL: https://www-nds.iaea.org/medical/gamma_emitters.html
13. Koning A. ISOTOPIA-1.0 Simulation of medical isotope production with accelerators. Manual of the software for simulation of medical isotope production with accelerators that runs the server side of the Medical Isotope Browser. – 2019. – 59 p. URL: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.pdf>
14. Medical Isotope Browser IAEA Nuclear Data Section. URL: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.html> (дата обращения 2024-01-09).
15. Scholten B., QaimS.M., Stocklin G.J. Production of ^{123}I at a low-energy Cyclotron // Labell. Compounds and Radiopharm. – 1989. – No. 26. – P. 175–176.
16. Silvester D.J., Sugden J., Walson I.A. Preparation of Iodine-123 by Natural Antimony // Radiochem. Radioanal. Letters. – 1969. – Vol. 2. – No. 1. – P. 17–20.
17. Acerbi E., C. Birattari, M. Castiglioni, F. Resmini, VillaM. EXFOR A0266: Production of ^{123}I for medical purposes at the Milan AVF cyclotron // Int. J. Appl. Radiat. Isot. –1975. – Vol. 26.–P. 741–747.
18. Kondo K., Lambrecht R. M., Wolf A. P. EXFOR B0090: ^{123}I production for radiopharmaceuticals–XX: Excitation functions of the $^{124}\text{Te}(p,2n)^{123}\text{I}$ and $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ reactions and the effect of target enrichment on radionuclidic purity // Int. J. Appl. Radiat. Isot. – 1977. – Vol. 28. –P. 395–401.
19. Scholten B., Kovacs Z., Tarkanyi F. T., Qaim S. M. EXFOR D4019: Excitation functions of $^{124}\text{Te}(p,xn)^{123,124}\text{I}$ reactions from 6 to 31 MeV with special reference to the production of ^{124}I at a small cyclotron // App. Radiat. Isot. – 1995.– Vol. 46. – P. 255–259.
20. Van Den Bosch R., De Goeij J. J. M., Van Der Heide J. A., Tertoolen J. F. W., Theelen H. M. J., Zegers C. EXFOR B0167: A new approach to target chemistry for the iodine-123 production via the $\text{Te}(p,2n)$ reaction // Int. J. App. Radiat. Isot. – 1977.– Vol. 28. –P. 255–261.
21. Zweit J., Bakir M. A., Ott R. J., Sharma H. L., Cox M., Goodall R. EXFOR O1260: Excitation functions of proton induced reactions in natural tellurium-production of no-carrier added iodine-124 for PET-applications // 4th Int. Workshop on Targetry, Villigen, Switzerland. – 1991. – Vol.76. – P. 74.
22. Ahmed M., Hassan H. E., Hassan K. F., Khalaf A. M., Saleh Z. A. EXFOR D0647: Cross sections for the formation of radioiodine in proton bombardment of natural tellurium with particular reference to the validation of data for the production of ^{123}I //Radioch. Acta. – 2011. – Vol. 99. – P. 317–323.

23. El-Azony K. M., Suzuki K., Fukumura T., Szelecsenyi F., Kovacs Z. EXFOR D0502: Proton induced reactions on natural tellurium up to 63 MeV: Data validation and investigation of possibility of ^{124}I production // *Radioch. Acta.* – 2008. – Vol. 96. – P. 763–769.
24. Kandil S. A and Al-Abyad M. EXFOR D0707: Cross section measurements and theoretical calculations of proton induced nuclear reactions on natural tellurium // *Radioch. Acta.* – 2013. – Vol. 101. – P. 67–72.
25. Kiraly B., Tarkanyi F. T., Takacs S., Kovacs Z. EXFOR D4177: Excitation functions of proton induced nuclear reactions on natural tellurium up to 18 MeV for validation of isotopic cross sections // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* – 2006. – Vol. 270. – P. 369–378.
26. Scholten B., Qaim S. M., Stocklin G., EXFOR A0473: Excitation functions of proton induced nuclear reactions on natural tellurium and enriched ^{123}Te : Production of ^{123}I via the $^{123}\text{Te}(p,n)^{123}\text{I}$ -process at a low-energy cyclotron // *Int. J. Radiat. Appl. Instrum., Part A, Appl. Radiat. Isotop.* – 1989. – Vol. 40. – P. 127–132.
27. Zarie K., Hammad N. A., Azzam A., EXFOR O1736: Excitation functions of (p,xn) reactions on natural tellurium at low energy cyclotron: relevance to the production of medical radioisotope I-123 // *J. Nucl. Radiat. Phys.* – 2006. – Vol. 1. – P. 93.
28. Kormali S. M., Swindle D. L., Schweikert E. A., EXFOR D4073: Charged particle activation of medium Z elements. II. Proton excitation functions // *J. Radioanal. Chem.* – 1976. – Vol. 31. – P. 437–450.
29. Гурина Н., Чакурова Е. Т., Медведева З. В., Солонинкина С. Г. Перспективы развития ядерной медицины в Республике Казахстан: реакторные изотопы редкоземельных элементов для терапии // *Вестник НЯЦ РК.* – 2022. – № 2. – С. 46–52. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-2-46-52>
30. Тажединов И., Аманкулов Ж.М., Жалмукаш У.К., Хусаин Ш.К., Хан О.Г. Некоторые перспективные радионуклиды в ядерной медицине Казахстана // *Вестник НЯЦ РК.* – 2018. – № 1. – С. 31–35. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2018-1-31-35>
- Nesterov A.A. Radiofarmatsevticheskie preparaty na osnove radionuklidov yoda // *Izvestiya VUZov. Fizika.* – 2013. – Vol. 56. – No. 11/3. – P. 194–201.
8. Semenov A. S. Razrabotka metodov polucheniya radiofarmatsevticheskikh lekarstvennykh preparatov na osnove ^{123}I dlya meditsinskoy diagnostiki: dis. ... kand. tekhn. nauk: 2.6.8 /Natsional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskii universitet. – Tomsk, 2022. – 165 p. URL: <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-metodov-polucheniya-radiofarmatsevticheskikh-lekarstvennykh-preparatov-na-osnove>
9. Verevkin A.A., Stervoedov N.G., Kovtun G.P. Poluchenie i primenenie korotkozhivushchikh i ul'trakorotkozhivushchikh izotopov v meditsine // *Vestnik Khar'kovskogo universiteta.* – 2006. – Vol. 746, Issue. 4(32). – P. 54–64.
10. Kodina G.E., Krasikova R.N. Metody polucheniya radiofarmatsevticheskikh preparatov i radionuklidnykh generatorov dlya yadernoy meditsiny: uchebnoe posobie dlya vuzov. – Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2014. – 282 p.
11. Tarkanyi F. T. et al. Recommended nuclear data for medical radioisotope production: diagnostic gamma emitters // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* – 2019. – Vol. 319. – P. 487–531. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6142-4>
12. Medical Isotope Browser IAEA: Gamma Emitters. URL: https://www-nds.iaea.org/medical/gamma_emitters.html
13. Koning A. ISOTOPIA-1.0 Simulation of medical isotope production with accelerators. Manual of the software for simulation of medical isotope production with accelerators that runs the server side of the Medical Isotope Browser. – 2019. – 59 p. URL: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.pdf>.
14. Medical Isotope Browser IAEA Nuclear Data Section. URL: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.html> (data obrashcheniya 2024-01-09).
15. Scholten B., Qaim S.M., Stocklin G.J. Production of ^{123}I at a low-energy Cyclotron // *Label. Compounds and Radiopharm.* – 1989. – No. 26. – P. 175–176.
16. Silvester D.J., Sugden J., Walson I.A. Preparation of Iodine-123 by Natural Antimony // *Radiochem. Radioanal. Letters.* – 1969. – Vol. 2. – No. 1. – P. 17–20.
17. Acerbi E., C. Birattari, M. Castiglioni, F. Resmini, Villa M. EXFOR A0266: Production of ^{123}I for medical purposes at the Milan AVF cyclotron // *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* – 1975. – Vol. 26. – P. 741–747.
18. Kondo K., Lambrecht R. M., Wolf A. P. EXFOR B0090: ^{123}I production for radiopharmaceuticals–XX: Excitation functions of the $^{124}\text{Te}(p,2n)^{123}\text{I}$ and $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ reactions and the effect of target enrichment on radionuclidic purity // *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* – 1977. – Vol. 28. – P. 395–401.
19. Scholten B., Kovacs Z., Tarkanyi F. T., Qaim S. M. EXFOR D4019: Excitation functions of $^{124}\text{Te}(p,xn)^{123,124}\text{I}$ reactions from 6 to 31 MeV with special reference to the production of ^{124}I at a small cyclotron // *App. Radiat. Isot.* – 1995. – Vol. 46. – P. 255–259.
20. Van Den Bosch R., De Goeij J. J. M., Van Der Heide J. A., Tertoolen J. F. W., Theelen H. M. J., Zegers C. EXFOR B0167: A new approach to target chemistry for the iodine-123 production via the $\text{Te}(p,2n)$ reaction // *Int. J. App. Radiat. Isot.* – 1977. – Vol. 28. – P. 255–261.
21. Zweit J., Bakir M. A., Ott R. J., Sharma H. L., Cox M., Goodall R. EXFOR O1260: Excitation functions of proton

- induced reactions in natural tellurium-production of no-carrier added iodine-124 for PET-applications // 4th Int. Workshop on Targetry, Villigen, Switzerland. – 1991. – Vol. 76. – P. 74.
22. Ahmed M., Hassan H. E., Hassan K. F., Khalaf A. M., Saleh Z. A. EXFOR D0647: Cross sections for the formation of radioiodine in proton bombardment of natural tellurium with particular reference to the validation of data for the production of ^{123}I // *Radioch. Acta.* – 2011. – Vol. 99 – P. 317–323.
23. El-Azony K. M., Suzuki K., Fukumura T., Szelecsenyi F., Kovacs Z. EXFOR D0502: Proton induced reactions on natural tellurium up to 63 MeV: Data validation and investigation of possibility of ^{124}I production // *Radioch. Acta.* – 2008. – Vol. 96. – P. 763–769.
24. Kandil S. A and Al-Abyad M. EXFOR D0707: Cross section measurements and theoretical calculations of proton induced nuclear reactions on natural tellurium // *Radioch. Acta.* – 2013. – Vol. 101. – P. 67–72.
25. Kiraly B., Tarkanyi F. T., Takacs S., Kovacs Z. EXFOR D4177: Excitation functions of proton induced nuclear reactions on natural tellurium up to 18 MeV for validation of isotopic cross sections // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* – 2006. – Vol. 270. – P. 369–378.
26. Scholten B., Qaim S. M., Stocklin G., EXFOR A0473: Excitation functions of proton induced nuclear reactions on natural tellurium and enriched ^{123}Te : Production of ^{123}I via the $^{123}\text{Te}(p,n)^{123}\text{I}$ -process at a low-energy cyclotron // *Int. J. Radiat. Appl. Instrum., Part A, Appl. Radiat. Isotop.* – 1989. – Vol. 40. – P. 127–132.
27. Zarie K., Hammad N. A., Azzam A., EXFOR O1736: Excitation functions of (p,xn) reactions on natural tellurium at low energy cyclotron: relevance to the production of medical radioisotope I-123 // *J. Nucl. Radiat. Phys.* – 2006. – Vol. 1. – P. 93.
28. Kormali S. M., Swindle D. L., Schweikert E. A., EXFOR D4073: Charged particle activation of medium Z elements. II. Proton excitation functions // *J. Radioanal. Chem.* – 1976. – Vol. 31. – P. 437–450.
29. Gurin A. N., Chakrova E. T., Medvedeva Z. V., Soloninkina S. G. Perspektivy razvitiya yadernoy meditsiny v Respublike Kazakhstan: reaktornye izotopy redkozemel'nykh elementov dlya terapii // *Vestnik NYaTs RK.* – 2022. – No. 2. – P. 46–52. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-2-46-52>
30. Tazhedinov I., Amankulov Zh. M., Zhalmukash U. K., Khusain Sh. K., Khan O. G. Nekotorye perspektivnye radionuklidy v yadernoy meditsine Kazakhstana // *Vestnik NYaTs RK.* – 2018. – No. 1. – P. 31–35. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2018-1-31-35>

USING THE IAEA MEDICAL ISOTOPE BROWSER FOR SIMULATION THE PRODUCTION OF IODINE-123

S. N. Mukasheva*, D. A. Myngzhassarova

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

**E-mail for contacts: snmukasheva@gmail.com*

The paper presents the results of modeling the production of a medical isotope using the medical isotope browser of the International Atomic Energy Agency. A web application for the production of medical isotopes allows you to obtain the necessary data on a nuclear reaction based on user data: target radionuclide, irradiating particle or irradiating radiation, energy range, irradiation and cooling time. Tabular values and illustrated graphs of the cross section of the nuclear reaction are obtained based on modeling the production of the isotope iodine-123 from tellurium-124; The isotope decay products are presented. The simulation results were compared with the data recommended by the IAEA for this nuclear reaction for the gamma-emitting radionuclide iodine-123. It is shown that gamma-emitting radionuclide iodine-123 is one of the most convenient radionuclides for single-photon emission computed tomography. When experimental methods are not available, modern technologies in the field of computer modeling allow specialists in a narrow profile to use the achievements of world science to solve problems, in this case, for the production of medical isotopes. Modeling approaches for the production of iodine-123 are recommended for the production of other medical isotopes.

Keywords: *iodine-123, nuclear medicine, medical isotope, cross section, modeling.*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БРАУЗЕРА МЕДИЦИНСКИХ ИЗОТОПОВ IAEA
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЙОД-123

С. Н. Мукашева*, Д. А. Мынжасарова

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

**E-mail для контактов: snmukasheva@gmail.com*

В работе представлены результаты моделирования производства медицинского изотопа с использованием браузера медицинских изотопов Международного агентства по атомной энергии. Web-приложение для производства медицинских изотопов позволяет получить необходимые данные по ядерной реакции на основе пользовательских данных: радионуклид мишени, облучающая частица или облучающее излучение, диапазон энергий, время облучения и охлаждения. На основе моделирования получения изотопа йод-123 из теллура-124 получены табличные значения и иллюстрированные графики поперечного сечения ядерной реакции; представлены продукты распада изотопа. Проведено сравнение результатов моделирования с рекомендуемыми IAEA данными по данной ядерной реакции для гамма излучающего радионуклида йод-123. Показано, что гамма-излучающий радионуклид йод-123 является одним из наиболее удобных радионуклидов для проведения однофотонной эмиссионной компьютерной томографии. Когда не доступны экспериментальные методы современные технологии в области компьютерного моделирования позволяют специалистам узкого профиля использовать достижения мировой науки для решения задач в данном случае для производства медицинских изотопов. Подходы по моделированию получения йод-123 рекомендуется использовать для получения и других медицинских изотопов.

Ключевые слова: *йод-123, ядерная медицина, медицинский изотоп, поперечное сечение, моделирование.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-63-72>

УДК 528.013:553.495 (574.22)

РЕКОГНОСЦИРОВОЧНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНСЕРВИРОВАННЫХ УРАНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ И НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ

С. Б. Субботин*, П. Е. Кривицкий, Н. В. Ларионова, А. К. Айдарханова, А. С. Мамырбаева,
Ж. Е. Тлеуканова, И. А. Александрович, М. В. Скрипников, И. А. Бачурина, Р. Г. Ермакова

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

*E-mail для контактов: subbotin@nnc.kz

В работе приводятся данные рекогносцировочного (предварительного) радиационного обследования законсервированных уранодобывающих предприятий (ЗУДП) и прилегающих к ним населенных пунктов в южной части Северо-Казахстанской области (СКО). Показано, что по уровню значений мощности эквивалентной дозы (МЭД) участки расположения ЗУДП при периодическом пребывании населения на данных участках радиационной опасности не представляют. Исключение составляет ЗУДП Грачевское, где при обследовании значения МЭД достигали до 14 мкЗв/ч. В населенных пунктах значения МЭД варьировали от 0,1 до 0,5 мкЗв/ч. Повышенные значения отмечены на трассах автодорог. Было установлено существенное превышение установленных нормативных значений ЭРОА радона в п. Токсан би. Незначительное превышение ЭРОА радона обнаружено в п. Новоукраинка. В источниках питьевого водоснабжения обнаружено превышение содержания ^{238}U до 4 ПДК. В природных водах также выявлены превышения по ^{238}U до 5 ПДК. По суммарной альфа-активности отмечены превышения на уровне до 15 ПДК. В природных водах отмечено превышение до 10 ПДК. По результатам анализа данных, полученных при рекогносцировочном обследовании, для детального обследования выбраны ЗУДП Грачевское и населенный пункт Новоукраинка.

Ключевые слова: законсервированные уранодобывающие предприятия, радиационное обследование, мощность эквивалентной дозы, предельно допустимая концентрация, удельная активность.

ВВЕДЕНИЕ

В результате экологически разрушительных действий, производимых в процессе освоения природных ресурсов в земных недрах, происходит значительное ухудшение экологической обстановки в промышленных районах. В этой связи, возникает экологическая проблема радиоактивного загрязнения районов расположения отработанных урановых шахт и рудников, которая последние десятилетия широко обсуждается в научных кругах и обществе. На месте отработок возникают бесплодные индустриальные пустыни, очаги эрозии, источники загрязнения атмосферы, воды и почвы на окружающей их территории.

Особое опасение вызывают условия, в которых находятся жители, проживающие в населенных пунктах вблизи законсервированных урановых рудников: наличие повышенного содержания радионуклидов в природной среде, сформированное в результате деятельности рудника, повышенная радоноопасность территории, наличие полей гамма-излучения в местах расположения залежей урана. Все это негативно влияет на окружающую среду, здоровье настоящего и будущего поколений.

В Северном Казахстане сосредоточены основные запасы урана эндогенных (гидротермальных) месторождений, где до середины 90-х годов осуществлялась отработка 12 урановых месторождений. К середине 90-х годов, вследствие обвального падения цен на продукцию уранодобывающих предприятий и последовавшей затем остановки производства, практи-

чески все пункты хранения отходов предприятий (рудников), осуществлявших горно-шахтную отработку урановых месторождений, оказались безнадзорными. Радиоактивные отходы урановой горнодобывающей отрасли, в процессе деятельности которой добыто свыше 80 тыс. т урана, составляют 222 млн т с суммарной активностью порядка 251 тыс. Кюри. Большую их часть составляют отходы горно-химических предприятий: только в хвостохранилище Прикаспийского горно-металлургического комбината накоплено 173 млн т активностью 187 тыс. Кюри [1].

С целью обеспечения безопасности природной среды и населения, в рамках программы «Консервация уранодобывающих предприятий и ликвидация последствий разработки урановых месторождений на 2001–2010 гг.» урановые рудники были законсервированы Республиканским государственным предприятием «Уранликвидрудник». На данное предприятие была возложена обязанность по осуществлению наблюдения и периодического радиационного контроля рекультивированных объектов, а также осуществление восстановительных работ по их целостности. Однако, в 2010 году в связи с прекращением деятельности РГП «Уранликвидрудник», мониторинговые исследования и производственный контроль на промышленных площадках рудников остановлены и более не проводятся.

Ситуация существенно осложнена тем, что вокруг урановых рудников СКО сегодня не осталось ограждений и знаков радиационной опасности, дороги для

въезда на их территорию открыты. В районе расположения таких объектов население самовольно производит выпас скота, разбирает сооружения для использования стройматериалов в хозяйственных целях, дети с ближайших сел играют в заброшенных сооружениях, которые могут иметь радиоактивное загрязнение. Кроме того, т. к. управление ресурсами на территории бывших рудников отсутствует, возможно загрязнение подземных вод вследствие их неконтролируемого поступления в горные выработки. Соответственно, водная среда может стать еще одним источником распространения радиоактивного загрязнения на близлежащие земли.

Для решения проблемы заброшенных рудников необходимо, в первую очередь, провести радиационное обследование территорий расположения законсервированных уранодобывающих предприятий (ЗУДП) и населенных пунктов, расположенных в зоне их влияния. Далее, основываясь на результатах таких исследований, можно будет обоснованно провести работы по ликвидации источников возможного радиоактивного загрязнения территории и разработать все необходимые меры по реабилитации данных территорий.

Основной задачей данной работы являлось проведение оценки влияния ЗУДП на радиационную об-

становку населенных пунктов и по результатам рекогносцировочного (предварительного) обследования выбрать ЗУДП и населенный пункт для детальных изысканий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования

В качестве объектов для проведения рекогносцировочного обследования было выбрано 6 ЗУДП (Викторовское № 28, Восход № 30, Шолпакское № 32, Молодежное № 78, Грачевское и Косачиное) и 5 населенных пунктов, расположенных на прилегающих к ЗУДП территориях. Схема расположения ЗУДП и населенных пунктов показана на рисунке 1.

Северо-Казахстанский регион на территории области представлен тремя структурно-металлогеническими зонами. Ишимско-Балкашинская урановорудная зона расположена на крайнем юго-западе области и простирается широтно. В пределах этой зоны располагаются 25 месторождений четырех урановорудных узлов. Ишимский рудный узел расположен в Акмолинской области на границе с СКО, включает два мелких по масштабам месторождения (Ишимское, Центральное) и Шетыркульское рудопроявление. Месторождения отработаны.

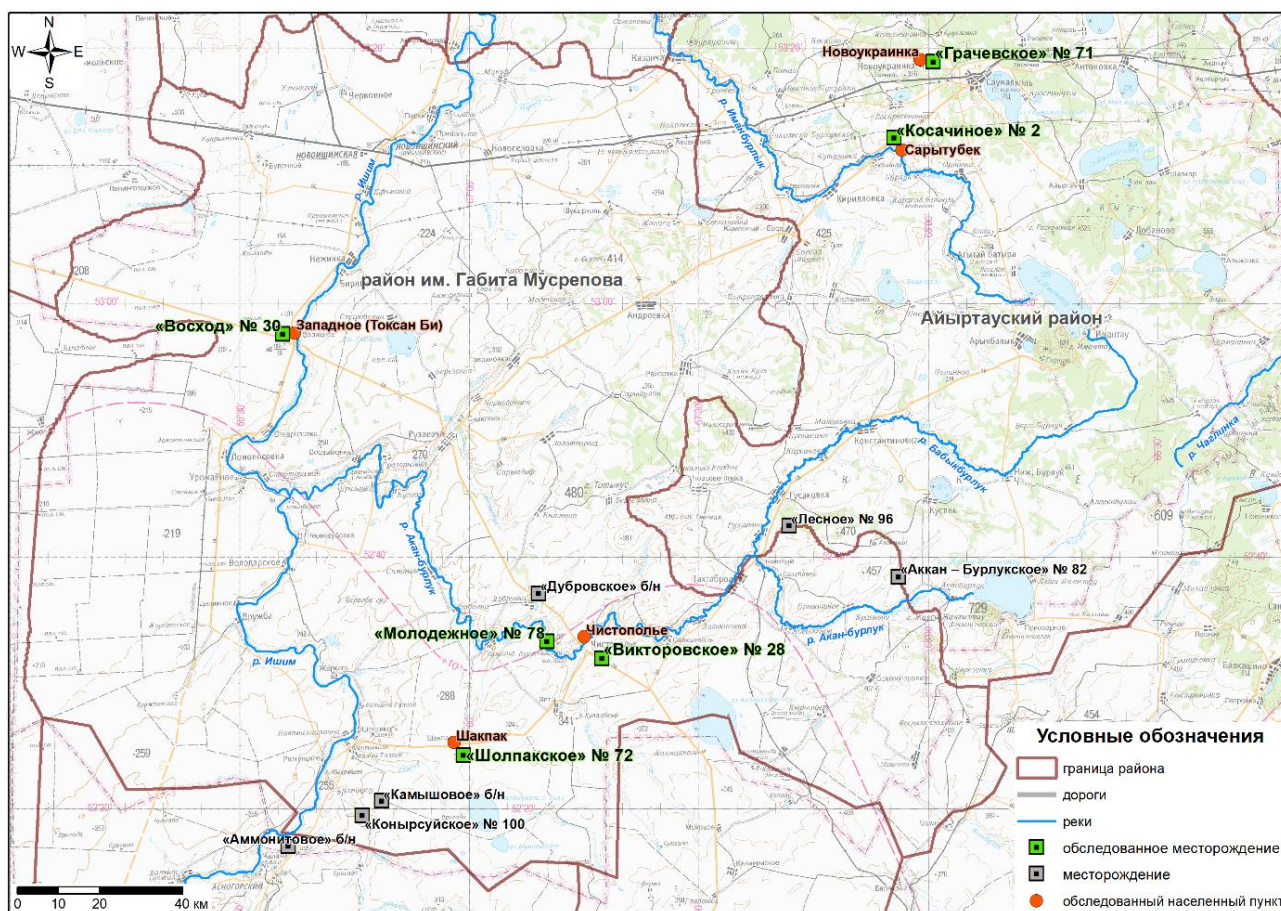


Рисунок 1. Схема расположения обследованных ЗУДП и населенных пунктов

Шокпак-Камышовый рудный узел расположен у границы с Акмолинской областью в 35 км юго-западнее райцентра Чистополье. Он объединяет месторождение Шокпакское (ныне отработанное) и Камышовое (законсервировано), а также ряд рудопроявлений – Прохладное, Анатолевское, Изотопное и другие. Чистопольский рудный узел своё наименование получил по названию райцентра, расположенного в пределах его площади. Здесь были выявлены месторождения Молодёжное, Дубровское, Викторовское. Балансовые запасы месторождения Камышовое 20,3 тыс. т.

Месторождение Викторовское, несмотря на крупные масштабы, не эксплуатировалось, находится в резерве. На месторождении проведена детальная разведка с применением горно-буровых работ. Выработки пройдены на двух горизонтах – 170 и 290 м от поверхности; из них пройдены квершлагаи и пробурены скважины. Рудная залежь на поверхности не выходит. Месторождение находится под покровом четвертичных суглинков мощностью 10–30 м. По имеющимся данным [1] в коре выветривания установлен радиоактивный ореол протяженностью 2,5 км и шириной до 400 м (интенсивность ореола в среднем 20–30 мкР/ч, в одной точке – 650 мкР/ч). Имеются отвалы шахты. Балансовые запасы 12,1 тыс. т.

Месторождение Молодежное. В коре выветривания под чехлом четвертичных отложений мощностью 10–15 м выявлен радиоактивный ореол с максимальной интенсивностью 200 мкР/ч на фоне 12–14 мкР/ч площадью 150×80 м. Проведена разведка бурением, пройдены шахты и подземные выработки на двух горизонтах – 90 и 180 м. Рудные тела пересечены квершлагами и ортами через 25 м. Глубина залегания оруденения варьирует от 50–70 м до 250 м. На месторождении развита глинисто-щебенистая кора выветривания мощностью 30–50 м (на юго-западном фланге до 250 м), которая осложняет условия отработки. Месторождение мелкое, непромышленное.

Володарская урановорудная зона расположена севернее Ишимско-Балкашинской. В её состав входят месторождения Грачёвского рудного узла. Наиболее крупные из них – Косачиное и Грачёвское, а также мелкие – Февральское, Бурукское и ряд рудопроявлений. В отработку было вовлечено только Грачёвское месторождение, Косачиное было детально разведано и подготовлено к эксплуатации. Последовавшие изменения конъюнктуры в отношении уранового сырья, а также политические и экономические преобразования привели к свертыванию добычи урана и консервации производства урана в Северном Казахстане.

Месторождение Грачевское. Фоновая радиоактивность пород варьирует от 0,2–0,4 мкЗв/ч до 0,8 мкЗв/ч, максимальная активность в аляскитовых гранитах – 12,8 мкЗв/ч (содержание урана – 21 мг/кг, тория – 57 мг/кг). Балансовые запасы 11,4 тыс. т.

Месторождение Косачиное. Под чехлом олигоцен-четвертичных отложений мощностью 5–40 м в коре выветривания домезозойских пород имеется радиометрический ореол в изолинии 100 мкР/ч (на фоне 25–50 мкР/ч) с небольшими перерывами на расстоянии около 6 км при ширине до 200 м. Горно-буровая детальная разведка проведена до глубины 850 м. Месторождение оценено как крупнейшее среди эндогенных месторождений РК. В настоящее время объект законсервирован, имеются отвалы шахт 1 и 2.

Месторождения Косачиное, Грачевское и Викторовское составляют 23% запасов урана Республики Казахстан.

Месторождение Восход № 30. Данное месторождение входит в состав Восходовской ураноносной зоны, охватывающей самую северо-западную часть Кокшетауского массива, граничит на востоке с Володарской зоной, а на юге с Ишимско-Балкашинской. В составе зоны четыре месторождения: Восход № 30, Рассвет, Восточное на юге зоны и одно Осеннее на севере зоны. Данные месторождения отнесены к мелким непромышленным объектам с рядовыми рудами и не эксплуатировались.

Общая характеристика обследованных населенных пунктов представлена в таблице 1 [1].

Таблица 1. Общая характеристика обследованных населенных пунктов

Название района	Площадь, тыс. км ²	Число жителей, тыс. чел.	Преобладающие виды производственной деятельности
Чистополье	9,81	2,46	энергетическая, аграрная, стройматериалов, пищевая, легкая
Западное (Токсан би)	3,46	0,79	пищевая, сельскохозяйственная, животноводческая
Шакпак	1,92	0,077	сельскохозяйственная, животноводческая
Новоукраинка	8,91	1,07	пищевая, сельскохозяйственная, животноводческая
Сарытубек	2,38	0,15	сельскохозяйственная, животноводческая

Методы исследования

Общая методология рекогносцировочного (предварительного) обследования заключалась в проведении полевых радиометрических измерений, отборе проб окружающей среды (грунт, вода) и их лабораторном анализе по определению химического состава, естественных и искусственных радионуклидов (ЕРН и ИРН). Выборочно, в воздухе жилых и административных зданий проводилось определение эквивалентной равновесной объемной активности дочерних продуктов радона и торона (ЭРОА). Радиационное обследование проводилось в летний и осенний периоды 2023 года. Определение содержания исследуемых компонентов проводилось в лабораторных условиях.

Полевое рекогносцировочное радиометрическое обследование проводилось методом гамма-съемки приборами Inspector 1000 и RadEye B20. При проведении обследования детектор перемещался над дневной поверхностью почвы во включенном состоянии в режиме «поиск». В местах с повышенными значениями гамма-излучения в фиксированных точках проводились измерения мощности эквивалентной дозы (МЭД) и β -излучения дозиметрами МКС-АТ 1117М, МКС-АТ 6130. При измерении МЭД детектор прибора располагался на высоте 5 см и 1 м над поверхностью земли, при этом бралось среднее значение из 5 измерений.

Отбор и консервирование проб воды осуществлялось согласно ГОСТ 31861-2012 и ГОСТ Р 51592-2003 [2, 3], которые распространяются на любые типы вод и устанавливают общие требования к отбору, транспортированию и подготовке к хранению проб воды, предназначенных для определения показателей ее состава и свойств.

Пробы донных отложений отбирались согласно ГОСТ 17.1.5.01-80 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность» и ГОСТ 17.4.3.01-2017 «Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб». Отбор проб донных почв производился методом укола с глубиной 0–5 см на площади 100 см² [4, 5].

Предварительно для получения общей характеристики водных объектов проведено изучение общего химического состава вод с использованием стандартных методик [6]: уровень pH, степень минерализации и жесткости, макрокомпоненты основного состава (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻).

При определении фоновых концентраций ЕРН и ИРН в воде необходимо применение методических подходов, которые позволяют понизить предел обнаружения удельной активности исследуемых радионуклидов, т.е. повысить чувствительность применяемого метода. Для этих целей в мировой практике используются методы концентрирования и разделения определяемых компонентов и их комбинации. Также для этих целей можно увеличить объем анализируемого образца.

Для определения ЕРН ⁴⁰K, ²³²Th и ²²⁶Ra в воде использовался физический метод предварительного концентрирования – выпаривание из больших объемов пробы, который применим для образцов воды с низким содержанием солей и направлен на концентрирование радионуклидов в минимальном объеме. Объем проб воды для анализа составил 10 л, каждая проба выпаривалась до сухого остатка. Удельная активность радионуклидов в сухом остатке определялась при помощи гамма-спектрометрического метода.

Для определения низких концентраций ²³⁸U в пробах воды использовался метод анализа на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой «ICP

MASS Spectrometer ELAN 9000», который позволяет проводить анализ ультраследового содержания элементов.

Определение содержания в отобранных пробах воды и грунтов ЕРН и ИРН выполнялось в соответствии со стандартной методикой [7].

Определение суммарной альфа-бета-активности проб воды проводилось с помощью метода упаривания до сухого остатка с приготовлением из него счетного образца, измеряемого на альфа-бета-радиометре [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На участках расположения обследованных ЗУДП (Викторовское № 28, Восход № 30, Шакпак, Молодежное № 78, Грачевское и Косачинское) стоят производственные разрушенные здания, шахтные стволы закрыты. Отвалы имеют ограждение только на ЗУДП Шакпак и Грачевское. Большая часть территорий расположения ЗУДП покрыта различной растительностью.



а)



б)

Рисунок 2. Общий вид ЗУДП: Викторовское № 28 (а), Восход № 30 (б)

ЗУДП Викторовское № 28. Площадь обследования 0,5 км². Среднее значение МЭД составляет 0,2 мкЗв/ч, максимальное – до 0,8 мкЗв/ч на отдельных кучах горных пород. В точке с максимальным значением МЭД произведен отбор пробы горной породы.

ЗУДП Восход № 30. Площадь обследования 0,25 км². Среднее значение МЭД составляет 0,12 мкЗв/ч, максимальное – до 0,7 мкЗв/ч на отдельных кучах горных пород. В точке с максимальным значением МЭД произведен отбор пробы горной породы.



а)



б)

Рисунок 3. Общий вид ЗУДП: Шакнак (а),
Молодежное № 78 (б)

ЗУДП Шакнак. Площадь обследования 1,0 км². Среднее значение МЭД составило 0,12 мкЗв/ч, максимальное – до 0,3 мкЗв/ч (очаг 3×3 м на трассе грунтовой автодороги). В точке с максимальным значением МЭД произведен отбор пробы горной породы.

ЗУДП Молодежное № 78. Площадь обследования 1,0 км². Среднее значение МЭД – 0,12 мкЗв/ч. Участков с повышенными значениями МЭД не обнаружено.



а)



б)

Рисунок 4. Общий вид ЗУДП: Грачевское (а),
Косачинское (б)

ЗУДП Грачевское. Площадь обследования 1,0 км². Значения МЭД варьировались от 0,12 до 14 мкЗв/ч. Максимальные значения фиксировались на обломках горных пород размером до 10×10×5 см. В точках с максимальным значением МЭД произведен отбор пробы горной породы.

ЗУДП Косачинское. Площадь обследования 1,0 км². Значения МЭД варьировались от 0,10 до 0,21 мкЗв/ч. В точках с максимальным значением МЭД произведен отбор пробы горной породы.

Анализ значений МЭД на обследованных участках расположения ЗУДП показал, что они находятся в пределах от 0,1 до 0,8 мкЗв/ч и при периодическом (временном) пребывании на данных участках радиационной опасности для населения не представляют. Исключение составляет ЗУДП Грачевское, где при обследовании были установлены опасные участки с значениями МЭД до 14 мкЗв/ч, что значительно превышает установленное среднее значения в течение года 2,5 мкЗв/ч для всех работников при работе с природными источниками [9].

**РЕКОГНОСЦИРОВОЧНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНСЕРВИРОВАННЫХ УРАНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ
И НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ**

При проведении полевого радиационного обследования населенных пунктов радиометрические измерения проводились вдоль трасс автодорог, по периметру ограждений частных домов и на территориях, прилегающих к общественным и административным зданиям. В отдельных частных и административных зданиях проводились измерения ЭРОА радона. В точках с повышенными значениями МЭД проводился отбор проб почвы. Из источников центрального хозяйственно-питьевого обеспечения, а также на ближайших реках и ручьях отобраны пробы воды для лабораторных анализов по определению химического и радионуклидного состава. Результаты полевого радиационного обследования населенных пунктов представлены в таблице 2.

Анализ значений МЭД в населенных пунктах показал, что они находятся в пределах от 0,1 до 0,5 мкЗв/ч. Повышенные значения МЭД в основном отмечались на трассах автодорог. На основании 9 измерений концентрации радона в жилых и административных зданиях, существенное превышение установленных значений ЭРОА радона [9] обнаружено в

частном доме п. Токсан би: в погребе – 16700 Бк/м³, в кухне – 627 Бк/м³. Незначительное превышение ЭРОА радона обнаружено в поселке Новоукраинка. В остальных точках превышений ЭРОА радона не обнаружено.

Анализ данных по радионуклидному составу проб горных пород и почвы (таблица 3) показал, что уровни активности горных пород радиационной опасности не представляют, поскольку находятся значительно ниже значений минимально значимой удельной активности (МЗУА), установленных Гигиеническими нормативами к обеспечению радиационной безопасности [9] (¹³⁷Cs 10000 Бк/кг; ²⁴¹Am 1000 Бк/кг; ²²⁶Ra 10000 Бк/кг; ²²⁸Ra 10000 Бк/кг; ²³²Th 1000 Бк/кг и ⁴⁰K 1000000 Бк/кг).

Вода из водозаборных скважин поселков Чистополье, Новоукраинка и Токсан би по определенным химическим показателям (таблица 4) пригодна для использования в хозяйственных целях, согласно Санитарным правилам, установленным в Республике Казахстан [10].

Таблица 2. Результаты полевого радиационного обследования населенных пунктов

Название населенного пункта	Название объекта	Координаты	Место измерения	ЭРОА, Бк/м ³	МЭД, мкЗв/час		
					внутри здания	на улице	на автодорогах
Чистополье	акимат	53°06'16,8" с.ш. 71°08'43,6" в.д.	подвал	47	0,14	0,3	от 0,12 до 0,25
	частный дом (центр поселка)	52°33'12,8" с.ш. 67°14'48,2" в.д.	погреб	115	0,20	0,12	
	дом культуры	52°33'37,2" с.ш. 67°15'05,7" в.д.	первый этаж	43	0,18	0,18	
Токсан би	частный дом	52°57'48,7" с.ш. 66°37'33,9" в.д.	погреб	15700	0,20	0,12	от 0,12 до 0,25
			кухня	6270			
Шакпак	автодороги		—	измерения не проводились	—	0,16	от 0,10 до 0,50
Новоукраинка	школа	53°18'50,9" с.ш. 67°59'31,3" в.д.	подвал	65	0,16	0,11	от 0,10 до 0,20
			учебный класс	97	0,16		
	частный дом	53°19'06,0" с.ш. 67°59'32,1" в.д.	зал	192	0,18	0,16	
	частный дом	53°19'01,0" с.ш. 67°59'38,5" в.д.	зал	397	0,20	0,18	
	частный дом	53°18'49,8" с.ш. 67°59'12,0" в.д.	зал	56	0,14	0,10	
частный дом	53°18'58,2" с.ш. 67°58'45,3" в.д.	зал	47	0,12	0,10		
Сарытубек	частный дом	53°12'02,9" с.ш. 67°56'29,7" в.д.	погреб	65	0,12	0,10	от 0,10 до 0,12
	частный дом	53°12'03,6" с.ш. 67°56'43,2" в.д.	зал	160	0,14	0,10	
	частный дом	53°12'03,6" с.ш. 67°56'43,2" в.д.	зал	99	0,12	0,10	
	частный дом	53°12'02,0" с.ш. 67°56'43,1" в.д.	зал	107	0,12	0,11	

**РЕКОГНОСЦИРОВОЧНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНСЕРВИРОВАННЫХ УРАНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ
И НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ**

Таблица 3. Результаты лабораторных анализов горных пород и почвы

Место отбора	Содержание гамма-излучающих радионуклидов, Бк/кг						
	²⁴¹ Am	¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²³⁸ U
ГОРНЫЕ ПОРОДЫ С ТЕРРИТОРИЙ ЗУДП							
ЗУДП Грачевское, т.1	<2	<1	960±200	77±15	77±15	570±115	280±55
ЗУДП Грачевское, т.3	<2	13±2	895±180	115±20	115±20	565±115	355±70
ЗУДП Грачевское, т.2	<2	<1	415±80	90±18	90±18	550±110	285±55
ЗУДП Шакпак	<2	<1	95±15	50±10	50±10	735±150	120±24
ЗУДП Восход, т.1	<2	<1	85±17	38±8	38±8	510±100	50±10
ЗУДП Косачиное, т.1	<2	2±1	40±8	43±9	43±9	650±130	40±8
уч-к Косачиное, т.2	<2	2±1	60±12	30±6	30±6	380±70	50±10
ПРОБЫ ПОЧВЫ С НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ							
пос. Чистополье, колонка	<2	<1	85±17	105±20	105±20	820±160	100±20
пос. Шакпак, ручей	<2	<1	45±9	43±8	43±8	560±115	80±16
Шакпак, озеро	<2	<1	110±20	45±10	45±10	400±80	160±32
пос. Токсан би, т.1	<2	7±1	45±8	35±7	35±7	490±100	35±7

Таблица 4. Результаты исследования общехимического анализа воды объектов водопользования

Наименование источника	рН	Жесткость, мг-экв/дм ³	Содержание катионов, мг/дм ³			Содержание анионов, мг/дм ³			М, г/дм ³
			Na ⁺ +K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	
ВОДА С ИСТОЧНИКОВ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ									
Чистополье (скважина)	8,9	4,0	45,0	60,0	14,0	25,0	350,0	65,0	440
Токсан би, кафе (скважина)	8,5	5,5	35,0	85,0	20,0	85,0	280,0	65,0	435
Токсан би (родник)	8,8	5,0	70,0	55,0	30,0	65,0	185,0	150,0	500
Шакпак (скважина)	9,0	12,0	270,0	80,0	95,0	300,0	440,0	380,0	1500
Новоукраинка (скважина)	7,7	0,1	135,0	1,0	1,0	25,5	12,5	495,0	740
Сарытубек (скважина)	9,2	13,5	790,0	120,0	90,0	205,0	396,5	1695,0	2935
ПРИРОДНЫЕ ВОДЫ									
река Анканбурлык	9,1	9,0	100,0	95,0	55,0	135,0	300,0	240,0	715
река Есиль	8,7	7,0	100,0	75,0	40,0	120,0	245,0	190,0	580
озеро Шакпак	8,5	5,5	75,0	70,0	25,0	50,0	360,0	70,0	470
Месторождение Восход (ручей)	8,1	10,0	10,0	130,0	45,0	145,0	215,0	135,0	635
Новоукраинка (ручей Безымянный)	8,9	10,5	800,0	110,0	60,5	135,5	550,0	1560,0	2725
ЗУДП Грачевское (карьер)	9,4	8,5	215,0	70,0	65,0	85,0	275,0	520,0	1210
Сарытубек (река Иманбурлык)	9,3	13,5	765,0	110,0	85,0	170,0	457,5	1605,0	2930
ПДК_в [77]	6-9	7,0	200	—	20	350	1000	500	1000

Примечание: содержание тяжелых металлов (As, Cd, Cu, Pb, Se, Zn) выше ПДК в воде не обнаружено.

Таблица 5. Результаты исследования радиационных характеристик проб воды

Наименование населенного пункта	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	Суммарная активность, Бк/л		U-238, мкг/л
					альфа	бета	
ВОДА С ИСТОЧНИКОВ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ							
Чистополье (колонка)	<0,1	<0,2	<0,2	<1,5	0,16±0,08	<0,34	4,3
Токсан би Привозная (скважина)	и/н	и/н	и/н	и/н	<0,14	<0,34	1,5
Токсан Би (родник)	и/н	и/н	и/н	и/н	1,14±0,17	<0,34	36
Шакпак (скважина)	1,0±0,2	<0,1	<0,1	<0,7	2,84±0,43	<0,37	58
Новоукраинка (скважина)	<0,04	<0,05	<0,05	<0,4	<0,14	<0,33	<п.о.
Сарытубек (скважина)	<0,04	<0,06	<0,06	<0,6	0,67±0,09	0,32±0,11	7,0±0,5
ПРИРОДНЫЕ ВОДЫ							
река Анканбурлык, 1	<0,1	<0,2	<0,2	<1,5	0,60±0,09	<0,34	11,0±0,8
п. Шакпак (озеро)	<0,2	<0,2	<0,2	<1,7	1,97±0,30	0,66±0,12	74,0±4,8
Месторождение Восход (ручей)	<0,2	<0,2	<0,2	<1,6	<0,14	0,36±0,11	5,6±0,4
п. Новоукраинка, (ручей Безымянный)	и/н	и/н	и/н	и/н	2,46±0,12	0,56±0,12	29,0±2,0
ЗУДП Грачевское (карьер)	и/н	и/н	и/н	и/н	2,74±0,12	1,11±0,12	79,0±5,1
п. Сарытубек (река Иманбурлык)	<0,04	<0,05	<0,05	<0,4	0,45±0,09	<0,33	5,3±0,4
п. Токсан би (река Есиль)	и/н	и/н	и/н	и/н	0,15±0,08	0,51±0,11	4,7±0,3
ПДК/УВ_{нас}	0,49	0,2	0,65	и/н	0,2	1,0	15

В воде из родника п. Токсан би установлено превышение по Mg^{2+} . В воде из скважины п. Шакпак – в пределах 2 ПДК по жесткости и 1 ПДК по $Na^+ + K^+$; 5 ПДК по Mg^{2+} . В воде из водозаборной скважины п. Сарытубек установлено 1 ПДК по жесткости, 4 ПДК по $Na^+ + K^+$, 2 ПДК по Mg^{2+} , 4 ПДК по SO_4^{2-} и почти 3 ПДК по минерализации. В природных водах отмечены превышения по катионно-анионному составу и по минерализации. Т.е. обследованные природные источники по химическому составу не пригодны для использования в питьевых целях.

По результатам анализа данных суммарной альфа- и бета-активностей превышений по бета-активности (1,0 Бк/кг) нет; по альфа-активности (0,2 Бк/кг) отмечены превышения на уровне 15 ПДК в воде из скважины питьевого водообеспечения п. Шакпак; на уровне 6 ПДК в воде из родника питьевого водообеспечения п. Токсан би; более, чем в 3 ПДК – в скважине п. Сарытубек.

В природных водах отмечено превышение по альфа-активности 3 ПДК в р. Анканбурлык, 10 ПДК в озере п. Шакпак, более чем в 10 ПДК в карьере ЗУДП Грачевское и более чем в 2 ПДК в р. Иманбурлык.

Результаты гамма-спектрометрических измерений водных проб показали, что удельная активность радионуклидов находится ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения $^{226}Ra < 0,1$ Бк/кг; $^{228}Ra < 0,2$ Бк/кг; $^{232}Th < 0,2$ Бк/кг и $^{40}K < 1,7$ Бк/кг. В воде из колонки п. Шакпак удельная активность ^{226}Ra составила 1,0 Бк/кг. Полученные данные не превышают значений уровня вмешательства, установленных Гигиеническими нормативами «Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности». При этом обнаружено превышение ПДК по ^{238}U в пределах 2 ПДК в воде из родника п. Токсан би и 4 ПДК в водозаборной скважине п. Шакпак. В природных водах обнаружено превышение по ^{238}U : в пределах 5 ПДК на озере возле п. Шакпак, 2 ПДК в воде безымянного ручья возле п. Новоукраинка, более чем 5 ПДК в карьере ЗУДП Грачевское.

Выводы

По уровню значений МЭД обследованные участки расположения ЗУДП (Викторовское № 28, Восход № 30, Шакпак, Молодежное № 78, Грачевское и Косачиное) при периодическом (временном) пребывании населения на данных участках радиационной опасности не представляют. Исключение составляет ЗУДП Грачевское, где при обследовании были установлены очаги, представляющие радиационную опасность для населения, с значениями МЭД до 14 мкЗв/ч.

Анализ значений МЭД в населенных пунктах показал, что они находятся в пределах от 0,1 до 0,5 мкЗв/ч. Повышенные значения МЭД в основном отмечались на трассах автодорог, поскольку при их строительстве использовались строительные матери-

алы с повышенным содержанием ЕРН. Отмечено существенное превышение установленных нормативных значений ЭРОА радона в поселке Токсан би. Незначительное превышение ЭРОА радона обнаружено в п. Новоукраинка. В источниках питьевого водообеспечения обнаружено превышение ПДК по ^{238}U в пределах 2 ПДК в воде из родника п. Токсан би и 4 ПДК в водозаборной скважине п. Шакпак. В природных водах обнаружено превышение по ^{238}U : в пределах 5 ПДК на озере возле п. Шакпак, 2 ПДК в воде безымянного ручья возле п. Новоукраинка, более чем 5 ПДК в карьере ЗУДП Грачевское. По суммарной альфа-активности отмечены превышения на уровне 15 ПДК в воде из скважины питьевого водообеспечения п. Шакпак и на уровне 6 ПДК в воде из родника питьевого водообеспечения п. Токсан би и более, чем в 3 ПДК в скважине п. Сарытубек. В природных водах отмечено превышение по альфа-активности 3 ПДК в р. Анканбурлык, 10 ПДК в озере п. Шакпак, более чем в 10 ПДК в карьере ЗУДП Грачевское и более чем в 2 ПДК в р. Иманбурлык.

По результатам анализа данных, полученных при рекогносцировочном (предварительном) обследовании, для детального обследования выбраны ЗУДП Грачевское и населенный пункт Новоукраинка.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках научного гранта AP19674615 «Оценка последствий разработки урановых рудников Северо-Казахстанской области».

ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет по мероприятию «Изучение радиационной обстановки на территории Республики Казахстан. Обеспечение радиационной безопасности» (результаты работ за период 2004–2008 гг.) // Республиканская бюджетная Программа № 01. – Алматы, 2008 г.
2. СТ РК ГОСТ Р 51592-2003. Вода. Общие требования к отбору проб. – Астана: Комитет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2003. – 37с.
3. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 60 с.
4. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 6 с.
5. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 4 с.
6. ГОСТ 26449.1-85 Установки дистилляционные опреснительные стационарные. Методы химического анализа соленых вод. – Москва, 1987.
7. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре: МИ 2143-91. – Введ. 1998-06-02. – Рег. № 5.06.001.98. – М.: НПО ВНИИФТРИ, 1991. – 18 с.
8. МВИ КЗ 07.00.03104-2015. Суммарная альфа- бета-активность природных вод (пресных и минерализованных). Подготовка проб и выполнение измерений.

Методика радиационного контроля. М.: ФГУП «ВИМС». 2013. – 31 с.

9. Гигиенические нормативы к обеспечению радиационной безопасности: утв. приказом Министра здравоохранения Республики Казахстан от 02 августа 2022 г. № ҚР ДСМ-71.
10. Санитарные правила «Санитарно-эпидемиологические требования к водоемосточникам, местам водозабора для хозяйственно-питьевых целей, хозяйственно-питьевому водоснабжению и местам культурно-бытового водопользования и безопасности водных объектов» / Утверждены приказом министра национальной экономики Республики Казахстан от 16 марта 2015 года – № 209.

REFERENCES

1. Otchet po meropriyatiyu «Izuchenie radiatsionnoy obstanovki na territorii Respubliki Kazakhstan. Obespechenie radiatsionnoy bezopasnosti» (rezul'taty rabot za period 2004–2008 gg.) // Respublikanskaya byudzhnaya Programma No. 01. – Almaty, 2008 g.
2. ST RK GOST R 51592-2003. Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob. – Astana: Komitet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2003. – 37 p.
3. GOST 31861-2012. Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob. – Moskva: Standartinform, 2013. – 60 p.
4. GOST 17.1.5.01-80. Okhrana prirody. Gidrosfera. Obshchie trebovaniya k otboru prob donnykh otlozheniy

vodnykh ob'ektov dlya analiza na zagryaznennost'. – Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 2002. – 6 p.

5. GOST 17.4.3.01-2017. Okhrana prirody. Pochvy. Obshchie trebovaniya k otboru prob. – Moscow: Standartinform, 2018. – 4 p.
6. GOST 26449.1-85 Ustanovki distillyatsionnye opresnitel'nye statsionarnye. Metody khimicheskogo analiza solenyykh vod. – Moscow, 1987.
7. Aktivnost' radionuklidov v ob'emnykh obraztsakh. Metodika vypolneniya izmereniy na gamma-spektrometre: MI 2143-91. – Vved. 1998-06-02. – Reg. No. 5.06.001.98. – Moscow: NPO VNIIFTRI, 1991. – 18 p.
8. MVI KZ 07.00.03104-2015. Summarnaya al'fa- beta-aktivnost' prirodnykh vod (presnykh i mineralizovannykh). Podgotovka prob i vypolnenie izmereniy. Metodika radiatsionnogo kontrolya. Moscow: FGUP “VIMS”. 2013. – 31 p.
9. Gigenicheskie normativy k obespecheniyu radiatsionnoy bezopasnosti: utv. prikazom Ministra zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan ot 02 avgusta 2022 g. № ҚР ДСМ-71.
10. Sanitarnye pravila «Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k vodoistochnikam, mestam vodozabora dlya khozyaystvenno-pit'evyykh tseley, khozyaystvenno-pit'evomu vodosnabzheniyu i mestam kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya i bezopasnosti vodnykh ob'ektov» / Uтверждены приказом министра националь'ной экономики Республики Казахстан от 16 марта 2015 года – No. 209.

СОЛТҮСТІК ҚАЗАҚСТАН ОБЛЫСЫНЫҢ ОҢТҮСТІК БӨЛІГІНДЕГІ КОНСЕРВАЦИЯЛАНҒАН УРАН ӨНДІРУШІ КӘСІПОРЫНДАР МЕН ЕЛДІ МЕКЕНДЕРДІ АЛДЫН АЛА БАРЛАП ЗЕРТТЕУ

С. Б. Субботин*, П. Е. Кривицкий, Н. В. Ларионова, А. К. Айдарханова, А. С. Мамырбаева,
Ж. Е. Тлеуканова, И. А. Александрович, М. В. Скрипников, И. А. Бачурина, Р. Г. Ермакова

ҚР ҰҰО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Қурчатов, Қазақстан

**Байланыс үшін E-mail: subbotin@mnc.kz*

Жұмыста Солтүстік Қазақстан облысының (СҚО) оңтүстік бөлігіндегі консервацияланған уран өндіруші кәсіпорындарды (КУӨК) және оларға іргелес елді мекендерді алдын ала барлау бойынша зерттеу деректері келтіріледі. ЭДҚ мәндерінің деңгейі бойынша халықтың осы учаскелерде ауық-ауық болуына КУӨК учаскелері радиациялық қауіп төндірмейтіні көрсетілген. Ерекшелік Грачевское КУӨК байқалды, мұндағы зерттеу кезінде ЭДҚ мәні 14,0 мкЗв/сағ дейін жетті. Елді мекендерде ЭДҚ мәндері 0,1-ден 0,5 мкЗв/сағ дейін құбылды. Автожолдардың трассаларында жоғары мәндер байқалды. Токсан би кентінде радонның ЭТКБ белгіленген нормативтік мәндерінің айтарлықтай артуы байқалды. Новокраинка кентінде радонның ЭТКБ болмашы түрде ғана артқаны анықталды. Ауыз сумен жабдықтау көздерінде ²³⁸U құрамының 4 ШРШ-ға дейін артуы анықталды. Табиғи сулардағы ²³⁸U бойынша 5 ШРШ-ға дейін артуы анықталды. Жиынтық альфа-белсенділік бойынша 15 ШРШ-ға дейінгі деңгейде асып кетулер байқалды. Табиғи суларда 10 ШРШ-ға дейін артқаны байқалды. Алдын ала барлау бойынша зерттеу кезінде алынған деректерді талдау нәтижелері бойынша егжей-тегжейлі зерттеу үшін Грачевское КУӨК және Новокраинка елді мекені таңдалып алынды.

Түйін сөздер: консервацияланған уран өндіруші кәсіпорындар, радиациялық зерттеу, эквивалентті доза қуаты, шекті рауалы шоғырлану, мениікті белсенділік.

**RECONNAISSANCE SURVEY OF MOTHBALLED URANIUM MINING
FACILITIES AND SETTLEMENTS IN THE SOUTHERN PART
OF THE NORTH-KAZAKHSTAN REGION**

S. B. Subbotin*, P. E. Krivitsky, N. V. Larionova, A. K. Aidarkhanova, A. S. Mamyrbayeva,
Zh. E. Tleukanova, I. A. Aleksandrovich, M. V. Skripnikov, I. A. Bachurina, R. G. Ermakova

Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

**E-mail for contacts: subbotin@nnc.kz*

This paper provides data of the reconnaissance (preliminary) radiation survey of mothballed uranium mining facilities (MUMF) and adjacent settlements in the southern part of the North-Kazakhstan region (NKR). It is shown that, according to the level of EDR values, MUMF locations, when the public periodically stays in these areas, do not pose any radiation hazard. The exception is Grachevskoe MUMF where EDR values reached up to 14.0 $\mu\text{Sv/h}$. Around the settlements, EDR values vary from 0.1 to 0.5 $\mu\text{Sv/h}$. Elevated values are noted on highways. Regulatory values of radon EEVA were also found to be significantly exceeded in Toksan bi vil. A minor excess of radon EEVA was detected in Novoukrainka vil. Exceedance of the content of ^{238}U up to 4 MPC was detected in sources of drinking water supply. Exceedances of up to 5 MPC for ^{238}U were also found in natural waters. The total alpha activity showed an excess of up to 15 MPC. Natural waters exhibit an excess of up to 10 MPC. Based upon the data analysis during the reconnaissance survey, the Grachevskoe MUMF and Novoukrainka settlement were selected for a detailed survey.

Keywords: *mothballed uranium mining facilities (MUMF), radiation survey, equivalent dose rate, maximum permissible concentration, specific activity.*

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-73-79>

УДК 556.3:543.3:546.11546.21:551.588 (574.51)

ОЦЕНКА ИСТОЧНИКОВ ФОРМИРОВАНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

**Т. Ш. Токтаганов¹, А. О. Айдарханов¹, А. К. Айдарханова¹,
Е. В. Сотников², А. С. Мамырбаева^{1*}, Ж. Е. Тлеуканова¹**

¹ Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

² Институт гидрогеологии и геоэкологии имени У.М. Ахмедсафина,
ТОО «Hydrogeology consulting group», Алматы, Казахстан

*E-mail для контактов: tamyrbayeva@nnc.kz

В статье представлены результаты использования стабильных изотопов водорода и кислорода для понимания происхождения и динамики водных ресурсов, особенно подземных вод. Исследования включали отбор проб из испытательных скважин и гидрологических постов, лабораторные исследования на соотношение стабильных изотопов и химический анализ. Результаты показали, что стабильные изотопы меняются в зависимости от сезона, что указывает на изменение источника водоснабжения с течением времени. В исследовании также рассматривалось влияние процессов испарения на водные объекты. Результаты дают ценную информацию для эффективного управления и сохранения водных ресурсов в регионе.

Ключевые слова: стабильные изотопы водорода и кислорода, подземная вода, гидрологические посты, водные ресурсы, изменение климата.

ВВЕДЕНИЕ

Вода является жизненно важным ресурсом для поддержания жизни, и ее доступность и качество имеют решающее значение для благополучия человека и здоровья экосистемы. Ресурсы пресной воды подвергаются все большему давлению из-за роста населения, изменения климата и загрязнения. Существует острая необходимость в понимании происхождения и динамики водных ресурсов, особенно грунтовых вод. Так как стремительные темпы развития промышленности и сельского хозяйства, где доступность поверхностных вод ограничена, приводят к интенсивной эксплуатации подземных вод. Стабильные изотопы водорода и кислорода являются мощным инструментом, который можно использовать для улучшения понимания процессов водных систем и для поддержки усилий по сохранению пресной воды [1]. Распределение изотопов контролируются разными стадиями круговорота воды и связаны с гидрологическими процессами и температурой, при которой она испаряется [2]. В результате изотопный состав воды позволяет отслеживать движение воды в окружающей среде и выявлять источники воды и оценки эффективности мер по сохранению.

Стабильные изотопы водорода и кислорода применимы в исследованиях по сохранению пресной воды несколькими способами, в том числе:

– *определение источников воды:* изотопный состав пресной воды можно использовать для определения источника воды, что позволит оценить качество воды и определить потенциальные источники загрязнения. Например, подземные воды, пополняемые за счет осадков, будут иметь другой изотопный состав, чем подземные воды, пополняемые за счет поверхностных вод [3, 4].

– *отслеживание движения воды:* изотопный состав воды позволяет отслеживать движение воды в окружающей среде. Эти данные могут быть использованы для оценки возможности заболачивания, для определения областей, где происходит потеря воды, и для планирования устойчивого использования пресноводных ресурсов [5].

– *оценка скорости испарения:* изотопный состав воды, испаряющейся из поверхностных водоемов, отличается от изотопного состава воды, которая остается в воде. Эту разницу допускается использовать для оценки количества имевшего место испарения и для отслеживания движения водяного пара через атмосферу. Данная информация может быть использована для оценки потенциальной нехватки воды и планирования устойчивого использования пресноводных ресурсов [6].

Целью данной работы являлся применение методов изотопной гидрологии для определения условий формирования подземных и поверхностных вод Аралтобинской впадины, расположенной в области Жетысу.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Аралтобинская впадина, расположенная в области Жетысу на юго-востоке Республики Казахстана, – это бассейн р. Коктал, относящийся к бассейну р. Коксу. Водные запасы Аралтобинского бассейна находятся под влиянием ряда факторов, включая изменение климата, рост населения и развитие сельского хозяйства. Изменение климата приводит к таянию ледников в окружающих горах, что снижает количество воды, доступной для бассейна. Рост населения увеличивает нагрузку на водные ресурсы бассейна, поскольку все больше людей нуждаются в воде для питья, орошения и промышленных целей.



Рисунок 1. Вид на Аралтобинскую впадину (с СЗ стороны)

В бассейне р. Коктал находится ряд рек и ручьёв, входящих в бассейн оз. Балкаш. Вся речная сеть района исследований относится к бассейну трех рек – Коктал, Каскентерек и Терсаккан. Все эти реки сливаются в р. Коктал и впадают в р. Коксу на северо-востоке Аралтобинской впадины. Аралтобинская впадина окружена со всех сторон горными хребтами Южной Джунгарии. Общая площадь впадины достигает 160 км² при средней длине 20 км и ширине 8 км (рисунок 1).

Отбор проб производился в Аралтобинской впадине: подземные воды отбирались из трех опытных скважин (ОС) и поверхностные воды – на пяти гидрологических постах (ГП) (рисунок 2). Полевые работы по отбору проб поверхностных и подземных

вод проводились в октябре 2021 г., в феврале, мае, июне и июле 2022 г., всего было отобрано 37 проб, из них 11 проб подземных вод и 26 проб поверхностных вод.

Лабораторные работы включали подготовку и измерение образцов воды на соотношение стабильных изотопов.

Измерение отношения стабильных изотопов ²H/¹H и ¹⁸O/¹⁶O в анализируемом образце и стандарте проводилось на высокочувствительном лазерном спектрометре LGR 912-0008 [7]. В качестве внутренних стандартов использовались пробы воды, откалиброванные относительно международного стандарта VSMOW (МАГАТЭ). Точность определения ²H и ¹⁸O составила ±0,5 ‰ и 0,1 ‰, соответственно.

В образцах воды проведены анализы по определению химического состава, анализ воды проводился в соответствии с ГОСТ 26449.1-85 [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно полученным результатам отношения стабильных изотопов в осенний период по кислороду изменяются от –13,7‰ до –11,5‰; а по дейтерию от –94,1‰ до –88,1‰; в зимний период – по кислороду от –13,3‰ до 10,1‰; по дейтерию от –94,9‰ до –76,8‰; в весенний период – по кислороду от –15,5‰ до 10,9‰; по дейтерию от –96,4‰ до –82,7‰; в летний период – по кислороду от –14,8‰ до 10,1‰; по дейтерию от –93,4‰ до –74,4‰ (рисунок 3).

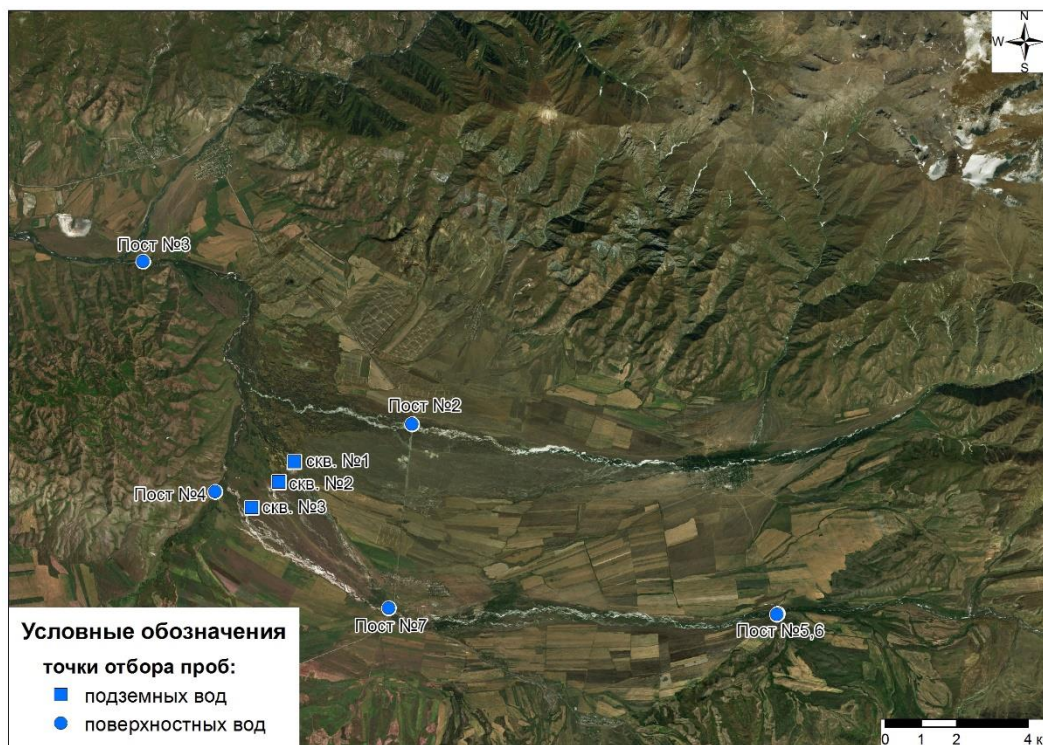


Рисунок 2. Точки отбора проб

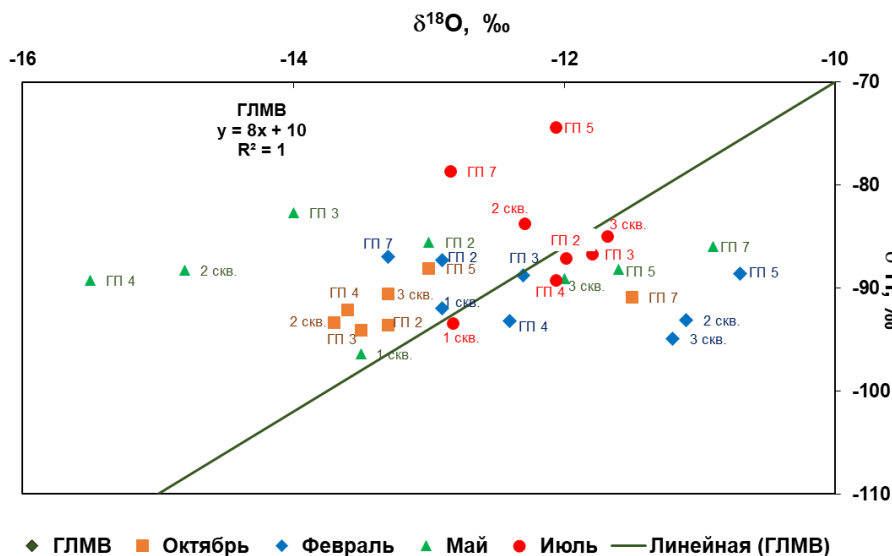


Рисунок 3. Результаты измерений $^2H/^{18}O$

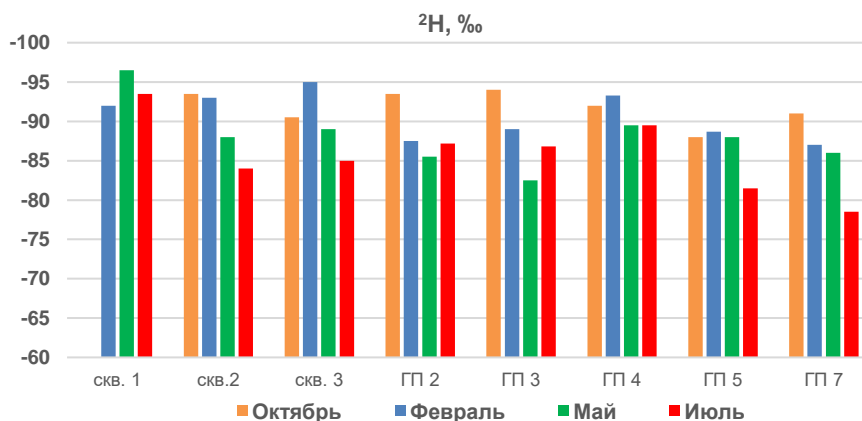


Рисунок 4. Изменения дейтерия в исследуемых водах

Полученные данные лабораторного анализа показали сезонность изменений вариации стабильных изотопов. Легкий изотопный состав в исследуемых водах наблюдается в весенний период, а тяжелый – в летний период.

На основе полученных результатов изотопного анализа построена гистограмма изменения распределения дейтерия (рисунок 4). Представленные на гистограмме данные можно интерпретировать как изменение источника питания воды. Значения δ^2H для проб воды, отобранных осенью и зимой, были одинаковыми, что свидетельствовало о том, что вода поступала из одного источника.

Однако значения δ^2H для проб воды, отобранных весной и летом, были более изменчивыми, что позволяет предположить, что вода поступала из нескольких источников. Одним из возможных объяснений изменения источника воды состоит в том, что талые воды могут смешиваться с подземными водами. Подземные воды обычно обеднены дейтерием, поэтому смешивание талых вод и подземных вод приводит к уменьшению значений δ^2H .

Также возможно наличие других дополнительных источников питания поверхностных вод, таких приток со стороны горных сооружений (скрытая разгрузка) и дождевые осадки. Эти источники воды также обеднены дейтерием, поэтому смешение исследуемых вод с родниковыми водами также приведет к уменьшению значений δ^2H .

В целом изменение значений δ^2H , представленное на гистограмме, свидетельствует о том, что источник воды в бассейне Аралтобинской впадины мог меняться с течением времени.

При проведении анализа проведен расчет d-excess, данный показатель важен при определении условий образования подземных и поверхностных вод. Избыток дейтерия (d-excess) в водах отражает степень испарения и применим для отслеживания источников влаги и изменений окружающей среды и рассчитывается согласно формуле $dex = \delta^2H - 8 \delta^{18}O$ [9]. Высокие значения d-excess могут указывать на высокую эвапотранспирацию, а низкие значения на преобладание пополнения другими источниками, которые имеют меньшие значения δ^2H [10].

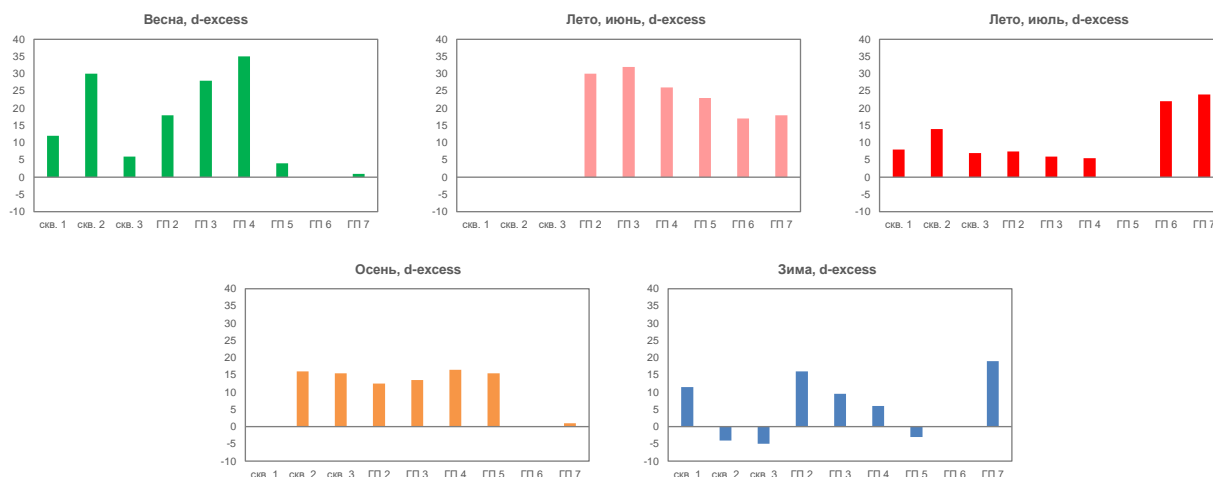


Рисунок 5. Изменение дейтериевого эксцесса

Проведенный сравнительный анализ в целом показывает, что наибольшие значения d-excess характерны для поверхностных вод, отобранных в летний период (июнь), когда скорость испарения была максимальной. Низкие значения d-excess наблюдаются зимой, когда скорость испарения была наименьшей. Это свидетельствует о том, что основным фактором, влияющим на воды бассейна Аралтобе, является испарение.

Данные также указывают на то, что значения d-excess в летний период в подземных водах (сква. № 2) несколько выше, чем в поверхностных водах. Это говорит о том, что воды скважин больше подвержены влиянию испарительных процессов.

Значения d-excess для проб воды, отобранных летом, были более изменчивы, чем значения d-excess для проб воды, отобранных в другие сезоны. Это указывает на то, что интенсивность испарения была более изменчивой летом, что могло быть связано с изменением погодных условий или с дополнительными источниками питания в виде осадков горного массива.

Значения d-excess для июньских образцов ГП №№ 2, 3, 4 и 5 значительно выше, чем значения d-excess для июльских образцов. Это говорит о том, что вода в реке в июне была более изменчивой, чем в июле. Данная изменчивость в воде может быть связана с рядом факторов:

- *испарение*: испарение может привести к увеличению концентрации дейтерия в воде, что приведет к более высокому значению d-excess.
- *дождь*: дождь может привести к снижению концентрации дейтерия в воде, что приведет к более низкому значению d-excess.
- *переток*: переток – это вода, которая течет через землю из области с большим количеством осадков в область с малым количеством осадков. Переток также может привести к снижению концентрации дейтерия в воде, что приведет к более низкому значению d-excess.

Уменьшение значения d-excess в июле связано с дополнительными источниками питания, возможные источники:

- *осадки*: осадки (ледники близлежащих гор) являются основным источником пополнения поверхностных вод.
- *снеготаяние*: снеготаяние является еще одним важным источником пополнения поверхностных вод.
- *слияние*: слияние с атмосферными осадками теплого периода является менее важным источником пополнения поверхностных вод.

Обратная картина наблюдается на ГП №№ 6 и 7, то есть воды на данных точках подвергаются активному испарению в июле, больше чем в июне. Такие изменения возможно связаны с внедрением родниковых вод и влиянием ледников гор на поверхностные воды в июне.

Изменение источника воды может иметь ряд последствий для ее качества воды. Например, вода, поступающая из нескольких источников, может с большей вероятностью содержать загрязняющие вещества или примеси. Кроме того, вода, смешанная с грунтовыми водами, может иметь более низкий pH, что делает ее более «агрессивной». Поэтому в качестве подтверждающего метода и для понимания генетических связей поверхностных и подземных вод определен химический состав вод.

Результаты химического анализа показали, что пробы воды сильно различаются по своему химическому составу. Концентрации различных катионов и анионов колеблются от очень низких до очень высоких. Например, концентрация кальция (Ca^{2+}) в пробах воды колеблется от 22 мг/л до 47 мг/л, а концентрация гидрокарбонатов (HCO_3^-) в пробах воды варьируется от 11 мг/л до 128 мг/л. Также видно, что пробы воды можно разделить на две группы в зависимости от их источника. Все пробы воды из скважин относительно схожи со средней концентрацией Ca^{2+} 30,6 мг/л и средней концентрацией HCO_3^- 119 мг/л.

Все поверхностные воды с гидрогеологических поств более изменчивы, со средней концентрацией Ca^{2+} 31,3 мг/л и средней концентрацией HCO_3^- 106,8 мг/л.

Показатели рН указывают на то, что эти воды не смешиваются с загрязненными водами образованные в результате сельскохозяйственной деятельности. Воды имеют слабощелочную среду со значениями рН от 7,4 до 8,1 (рисунок 6).

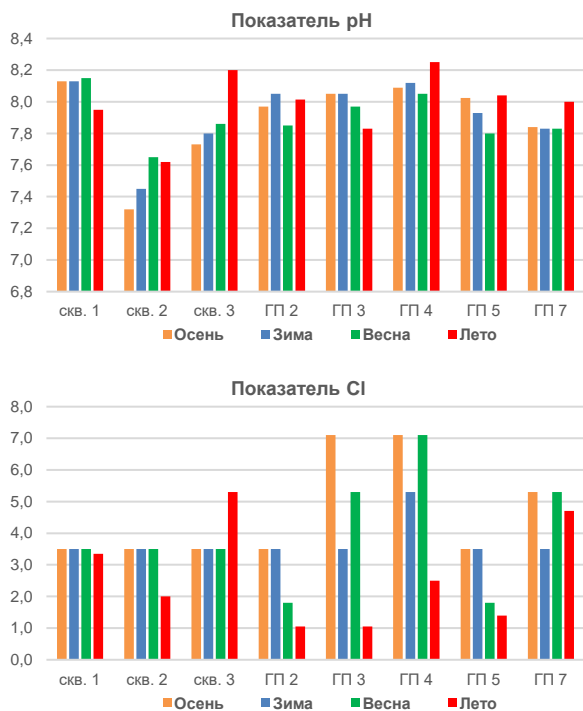


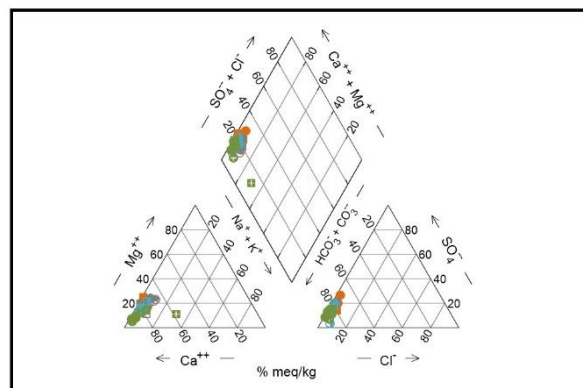
Рисунок 6. Изменения рН показателя и хлора

Низкий рН показатель наблюдается в водах ОС № 2, высокие показатели наблюдаются в скважине № 3 и на ГП № 4 в летние периоды, полученные результаты указывают на дополнительный источник питания в летний период в виде вод, образующихся при таянии снежного покрова гор. Тенденция изменения данного показателя в ГП № 2 и 5 имеют схожесть, данные точки расположены ниже (относительно других точек) и имеют питание в виде вод с гор, поступающих с северо-востока и северо-запада, то есть при смешивании вод показатели рН усредняются и в течение наблюдательных периодов имеют стабильные показатели. На ОС № 2 самые низкие показатели, расположение данной скважины говорит о поступлении только талых вод в весенний период, а в остальных периоды не пополняются другими источниками, так как находится на равнине.

По результатам построенной гистограммы распределения хлора, максимальные значения наблюдаются в поверхностных водах, а именно на ГП № 3 и 4 в осенний и зимний периоды, а в подземных водах максимальные значения хлор-иона наблюдается в летний период на ОС № 3, это свидетельствует о бы-

строй подпитке подземных вод этого участка поверхностными водами. Хлориды вымываются атмосферными осадками из засоленных почв, магматических пород, соленосных отложений, затем переносятся в реки, проникают в грунтовые воды.

Диаграмма Пайпера (1944) использовалась для классификации талых вод по гидрогеохимическим признакам. Данная диаграмма также позволяет установить связь между составом талой воды и типом породы путем построения значений основных катионов и анионов на этой диаграмме.



Легенда:
 ■ Осенние образцы подземных вод
 ● Осенние образцы поверхностных вод
 □ Зимние образцы подземных вод
 ○ Зимние образцы поверхностных вод
 ▲ Весенние образцы подземных вод
 ▽ Весенние образцы поверхностных вод
 ◆ Летние образцы подземных вод (июль)
 ○ Летние образцы поверхностных вод (июль)

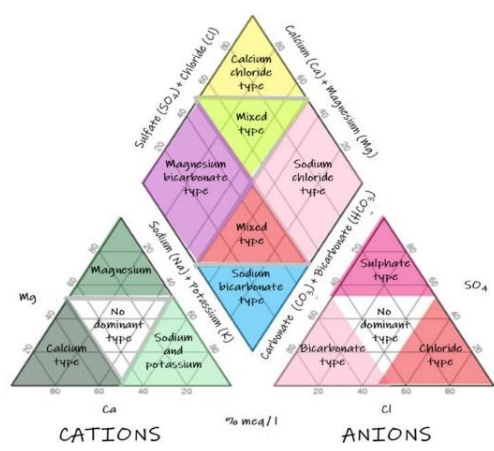


Рисунок 7. Диаграмма Пайпера

По результатам построенной диаграммы Пайпера видно, что все пробы имеют одинаковый состав, и относятся к гидрокарбонатно-кальциевым водам ($CaHCO_3$). Согласно этой диаграмме в исследуемых водах, щелочноземельные металлы ($Ca^{2+}Mg^{2+}$) преобладают над щелочными (Na^+K^+), а также слабые кислоты (HCO_3^-) доминируют над сильными кислотами ($SO_4^{+}Cl^-$), что подтверждает карбонатное выветривание. При карбонатном выветривании известковистые песчаники выщелачиваются из карбонатов, оставляя хорошо проницаемый песок, на котором быстро образуются песчаные парarendзины, а затем бурые почвы.

Выводы

По результатам проведенных работ, установлено следующее. Подземные воды Аралтобинского бассейна слабощелочные и имеют высокую концентрацию ионов кальция и гидрокарбоната. Поверхностная вода более кислая и имеет более высокую концентрацию ионов хлора. На воду в бассейне влияет испарение, которое ярко выражено в летний период.

Поверхностные воды получают питание весной за счет таяния снега и летом – в результате таяния снежных и ледяных покровов гор Джунгарского Алатау.

По химическому составу вода в бассейне относительно чистая, но важно следить за ее качеством, чтобы убедиться, что она безопасна для использования. Данные по pH показывают, что вода в бассейне слабощелочная. Вероятно, это связано с присутствием в воде ионов кальция и гидрокарбоната. Данные по хлоридам показывают, что концентрация ионов хлора выше в поверхностных водах, чем в подземных водах. Вероятно, это связано с тем, что ионы хлора более подвижны, чем ионы кальция и гидрокарбоната. Ионы хлорида могут переноситься поверхностными водами, но не так легко переносятся грунтовыми водами. Однако выявлено влияние поверхностных вод на подземные воды скважин № 1 и 3. При пополнении подземных вод поверхностными наблюдаются увеличение pH и концентрации хлора. Данные на диаграмме Пайпера показывают, что все пробы воды относятся к гидрокарбонатно-кальциевым водам. Это означает, что они щелочные и имеют высокую концентрацию ионов кальция и гидрокарбоната. Это согласуется с тем, что вода в бассейне Аралтобе поступает из района, богатого известняком. Установлено, что концентрация ионов гидрокарбоната в пробах воды колеблется от 11 мг/л до 128 мг/л. Ионы гидрокарбоната образуются при растворении углекислого газа в воде. Углекислый газ — это газ, присутствующий в атмосфере, и он легче растворяется в воде, когда вода теплая, поэтому летом концентрация ионов гидрокарбоната выше, чем зимой.

Данные по стабильным изотопам показывают, что вода летом имеет другой изотопный состав, чем зимой. Это свидетельствует о наличии нескольких источников питания. Данные по d-excess показывают, что летом вода более нестабильна, чем зимой. Это говорит о том, что летом d-excess более изменчив.

Данные исследования выполнены в рамках программно-целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан BR21881915 «Применение ядерных, сейсмических и инфразвуковых методов для оценки климатических изменений и смягчения последствий изменения климата» и договорных работ с ТОО «Hydrogeology consulting group».

ЛИТЕРАТУРА

1. Araguas-Araguas, L. J., Fröhlich, K., & Rozanski, K. (2000). Isotopic composition of deuterium and oxygen-18 precipitation and atmospheric moisture // *Hydrological Processes*. – 14(8). – P. 1341–1355.
2. Craig, H. (1961). Isotopic variations of meteoric waters // *Science*. – 133 (3465). – P. 1702–1703.
3. Токтаганов, Т.Ш. Оптимизация мониторинговых наблюдений вод на радиационно-опасных участках сип при помощи метода изотопной гидрологии / Т.Ш. Токтаганов, А.О. Айдарханов, М.Р. Актаев, Б.А. Кокежанов, С.С. Пронин, А.О. Искенов // *Вестник НЯЦ РК*. – Курчатов, 2018. – Вып. 4 (76). – С. 44–48.
4. Wassenaar, L. I., & Tertzter, S. (2018). The role of stable isotopes in understanding and managing global water resources. In *Isoscapes (2nd edition)* (pp. 177–204). Springer.
5. Kendall, K., & McDonnell, J. J. (1998). *Isotope tracers in watershed hydrology*. Elsevier.
6. Gat, J. R. (1996). Isotopes of oxygen and hydrogen in the hydrological cycle. *Annual Review of the Earth and Planetary Sciences*, 24(1), P. 225–262.
7. «Изотопный анализатор» Модель LGR 912-0008, Руководство пользователя. Документ № 912-U008 Переработанное и исправленное издание 01. Дата выпуска 9/12/2014.
8. ГОСТ 26449.1-85 «Установки дистилляционные определительные стационарные. Методы химического анализа соленых вод». ГОСТ 26449.1-85. Москва, 1987.
9. Chen, F.; Zhang, M.; A. Argiriou, A.; Wang, S.; Zhou, X.; Liu, X. Deuterium Excess in Precipitation Reveals Water Vapor Source in the Monsoon Margin Sites in Northwest China // *Water* 2020, 12, 3315. <https://doi.org/10.3390/w12123315>
10. Sreedevi, P.D., Srekanth, P.D. & Reddy, D.V. Deuterium Excess of Groundwater as a Proxy for Recharge in an Evaporative Environment of a Granitic Aquifer, South India // *J Geol Soc India* 97, (2021). – P. 649–655. <https://doi.org/10.1007/s12594-021-1740-0>
11. Брезгунов В.С., Есиков А.Д., Ферронский В.И., Сальнова Л.В. Пространственно-временные вариации изотопного состава кислорода атмосферных осадков и речных вод на территории северной части Евразии, их связь с использованием температуры // *Водные ресурсы*. – 1998. – Т. 25, № 1. – С. 73–84.

REFERENCES

1. Araguas-Araguas, L. J., Fröhlich, K., & Rozanski, K. (2000). Isotopic composition of deuterium and oxygen-18 precipitation and atmospheric moisture // *Hydrological Processes*. – 14(8). – P. 1341–1355.
2. Craig, H. (1961). Isotopic variations of meteoric waters // *Science*, 133 (3465). – P. 1702–1703.
3. Toktaganov, T.Sh. Optimizatsiya monitoringovykh nablyudeny vod na radiatsionno-opasnykh uchastkakh sип pri pomoshchi metoda izotopnoy gidrologii / T.Sh. Toktaganov, A.O. Aydarkhanov, M.R. Aktaev, B.A. Kokezhanov, S.S. Pronin, A.O. Iskenov // *Vestnik NYaTs RK*. – Kurchatov, 2018. - Issue 4 (76). – P. 44–48.
4. Wassenaar, L. I., & Tertzter, S. (2018). The role of stable isotopes in understanding and managing global water resources. In *Isoscapes (2nd edition)* (pp. 177–204). Springer.

5. Kendall, K., & McDonnell, J. J. (1998). Isotope tracers in watershed hydrology. Elsevier.
6. Gat, J. R. (1996). Isotopes of oxygen and hydrogen in the hydrological cycle // Annual Review of the Earth and Planetary Sciences, 24(1). – P. 225–262.
7. “Izotopnyy analizator” Model' LGR 912-0008, Rukovodstvo pol'zovatelya. Dokument No. 912-U008 Pererabotannoe i ispravlennoe izdanie 01. Data vypuska 9/12/2014.
8. GOST 26449.1-85 “Ustanovki distillyatsionnye opresnitel'nye statsionarnye. Metody khimicheskogo analiza solenykh vod”. GOST 26449.1-85. Moscow, 1987.
9. Chen, F.; Zhang, M.; A. Argiriou, A.; Wang, S.; Zhou, X.; Liu, X. Deuterium Excess in Precipitation Reveals Water Vapor Source in the Monsoon Margin Sites in Northwest China // Water 2020, 12, 3315. <https://doi.org/10.3390/w12123315>
10. Sreedevi, P.D., Sreekanth, P.D. & Reddy, D.V. Deuterium Excess of Groundwater as a Proxy for Recharge in an Evaporative Environment of a Granitic Aquifer, South India // J Geol Soc India 97 (2021). – P. 649–655. <https://doi.org/10.1007/s12594-021-1740-0>
11. Brezgunov V.S., Esikov A.D., Ferronskiy V.I., Sal'nova L.V. Prostranstvenno-vremennyye variatsii izotopnogo sostava kisloroda atmosferykh osadkov i rechnykh vod na territorii severnoy chasti Evrazii, ikh svyaz' s ispol'zovaniem temperatury // Vodnye resursy. – 1998. – Vol. 25, No. 1. – P. 73–84.

СУ ОБЪЕКТІЛЕРІНІҢ ҚАЛЫПТАСУ КӨЗДЕРІН БАҒАЛАУ

**Т. Ш. Тоқтағанов¹, А. О. Айдарханов¹, А. К. Айдарханова¹,
Е. В. Сотников², А. С. Мамырбаева^{1*}, Ж. Е. Тлеуканова¹**

¹ ҚР ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатова, Қазақстан

² У.М. Ахмедсафин атындағы Гидрогеология және геоэкология институты,
“Hydrogeology consulting group” ЖШС, Алматы, Қазақстан

*Байланыс үшін E-mail: mamyrbayeva@nnc.kz

Мақалада су ресурстарының, әсіресе жер асты суларының шығу тегі мен динамикасын түсіну үшін тұрақты сутегі мен оттегі изотоптарын қолдану нәтижелері келтірілген. Зерттеулерге сынақ ұңғымалары мен гидрологиялық бекеттерден сынама алу, тұрақты изотоптардың арақатынасы үшін зертханалық зерттеулер және химиялық талдау кірді. Нәтижелер тұрақты изотоптардың жыл мезгіліне байланысты өзгеретінін көрсетті, бұл уақыт өте келе сумен қамтамасыз етуші су көзінің өзгеруін көрсетеді. Зерттеу сонымен қатар булану процестерінің су объектілеріне әсерін қарастырды. Нәтижелер аймақтағы су ресурстарын тиімді басқару және сақтау үшін құнды ақпарат береді.

Түйін сөздер: сутегі мен оттегінің тұрақты изотоптары, жер асты суы, гидрологиялық бекеттер, су ресурстары, климаттың өзгеруі.

ASSESSMENT OF FORMATION SOURCES OF WATER BODIES

**T. Sh. Toktaganov¹, A. O. Aidarkhanov¹, A. K. Aidarkhanova¹,
E. V. Sotnikov², A. S. Mamyrbayeva^{1*}, Zh. E. Tleukanova¹**

¹ Branch “Institute of Radiation Safety and Ecology” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

² Institute of Hydrogeology and Geoecology named after U.M. Ahmedsafin,
LLP “Hydrogeology consulting group” Almaty, Kazakhstan

*E-mail for contacts: mamyrbayeva@nnc.kz

The article presents results on the utilization of stable hydrogen and oxygen isotopes to understand the origin and dynamics of water resources especially ground waters. Research involved sampling from test boreholes and gauging stations, laboratory research into the ratio of stable isotopes and a chemical analysis. Results showed that stable isotopes may change depending on a season, which indicates that a source of water supply also changes over time. Research also addressed the impact of evaporation processes on water bodies. Results provide valuable information to efficiently manage and preserve water resources in the region.

Keywords: stable isotopes of hydrogen and oxygen, ground water, gauging stations, water resources, climate change.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-80-88>

УДК 581.5:539.16 (574.41)

ИЗУЧЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И СОДЕРЖАНИЯ В НЕМ РАДИОНУКЛИДОВ НА ПЛОЩАДКЕ «АКТАН-БЕРЛИ»

Н. В. Ларионова^{1*}, А. В. Топорова¹, В. В. Полевик², Е. Н. Поливкина¹, П. Е. Кривицкий¹,
Л. В. Тимонова¹, Л. Ф. Субботина¹, М. Т. Абишева¹, В. Н. Монаенко¹, А. О. Айдарханов¹

¹ Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

² Университет имени Шакарима города Семей, Казахстан

*E-mail для контактов: larionova@nnc.kz

В статье представлена характеристика растительного покрова на площадке «Актан-Берли», в том числе содержание в нем естественных (⁴⁰K, ²³²Th, ²²⁶Ra) и искусственных (¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ³H) радионуклидов. Установлено, что растительный покров площадки представлен экосистемами высоких мелкосопочников, на западе граничащих с экосистемами низкогорий, а также экосистемами древнеаллювиальных и современных аллювиальных равнин. Содержание радионуклида ³H в свободной воде (ТСВ) и органической составляющей (ОСТ) находится ниже предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения (<8 Бк/кг). Концентрация естественных радионуклидов является типичной, в частности для почв Казахстана. Диапазон удельной активности ⁹⁰Sr в растениях изменяется от <0,7 до 6,7 Бк/кг, ¹³⁷Cs – от <0,6 до 1,1 Бк/кг, содержание ²⁴¹Am и ²³⁹⁺²⁴⁰Pu – в абсолютном большинстве случаев ниже предела обнаружения (<0,2 Бк/кг). Значения мощности дозы облучения растений ниже принятых международных критериев. В целом содержание радионуклидов в растительном покрове на территории площадки «Актан-Берли» находится существенно ниже предельно-допустимых уровней радиоактивного загрязнения кормовых растений и не представляет опасности при использовании исследуемой территории в хозяйственной деятельности.

Ключевые слова: СИП, «Актан-Берли», растительный покров, радионуклиды.

ВВЕДЕНИЕ

Семипалатинский испытательный полигон (СИП) – один из крупнейших полигонов, площадью около 18300 км², для проведения ядерных испытаний. Всего за период функционирования на специальных испытательных площадках, расположенных на его территории, было проведено 340 подземных испытаний, 30 наземных и 86 воздушных [1]. К наиболее крупным площадкам, как по площади, так и по количеству произведенных испытаний относятся «Опытное поле», «Дегелен», «Балапан» и «Сары-Узень». С 1949 по 1962 гг., в основном, проводились атмосферные и наземные испытания на площадке «Опытное поле», но после вступления в силу международного договора о запрете проведения ядерных испытаний в космосе, воздухе и воде испытания стали проводиться под землей («Дегелен», «Балапан» и «Сары-Узень»). Для проведения специфических экспериментов использовалась площадка «Телкем» – место проведения двух экскавационных ядерных взрывов, площадки «4» и «4а» – испытания боевых радиоактивных веществ (БРВ), а также площадка «Актан-Берли» – для проведения гидроядерных экспериментов (рисунок 1).

На сегодняшний день получена целостная картина относительно радионуклидного загрязнения растительного покрова для большинства территорий СИП [2–6]. Так, установлено, что максимальные значения удельной активности ¹³⁷Cs (87 кБк/кг) отмечены в районе радиоактивных водотоков на площадке

«Дегелен», ⁹⁰Sr (1500 кБк/кг) – в местах испытания БРВ, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu (9,5 кБк/кг) и ²⁴¹Am (0,53 кБк/кг) – в эпицентрах проведения наземных испытаний на площадке «Опытное поле» [7]. Повышенные концентрации трития выявлены в растениях, произрастающих на прилегающих территориях реки Шаган [8], а также по руслам пересохших ручьев, выходящих на значительные расстояния за пределы границ площадки «Дегелен» [4].

Одним из наименее изученных участков СИП, с точки зрения радиоактивного загрязнения растительного покрова, до недавнего времени оставалась площадка «Актан-Берли». Данная площадка расположена в южной части СИП, западнее площадки «Дегелен» и юго-восточнее площадки «Сары-Узень» (рисунок 1). Территория площадки равнинная, иногда слегка всхолмленная, расположена на отрогах гор Аршалык. Понижения рельефа заняты солончаками и озерами, наполняемость которых носит сезонный характер. Известно, что гидроядерные испытания на площадке «Актан-Берли» проводились в скважинах под землей на глубине 5–30 метров. Информация о местах проведения этих экспериментов (координаты участка либо схемы их расположения) полностью отсутствует. Целью настоящей работы было изучить растительный покров площадки «Актан-Берли», в том числе содержание в нем естественных (⁴⁰K, ²³²Th, ²²⁶Ra) и искусственных (¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ³H) радионуклидов.

ИЗУЧЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И СОДЕРЖАНИЯ В НЕМ РАДИОНУКЛИДОВ
НА ПЛОЩАДКЕ «АКТАН-БЕРЛИ»

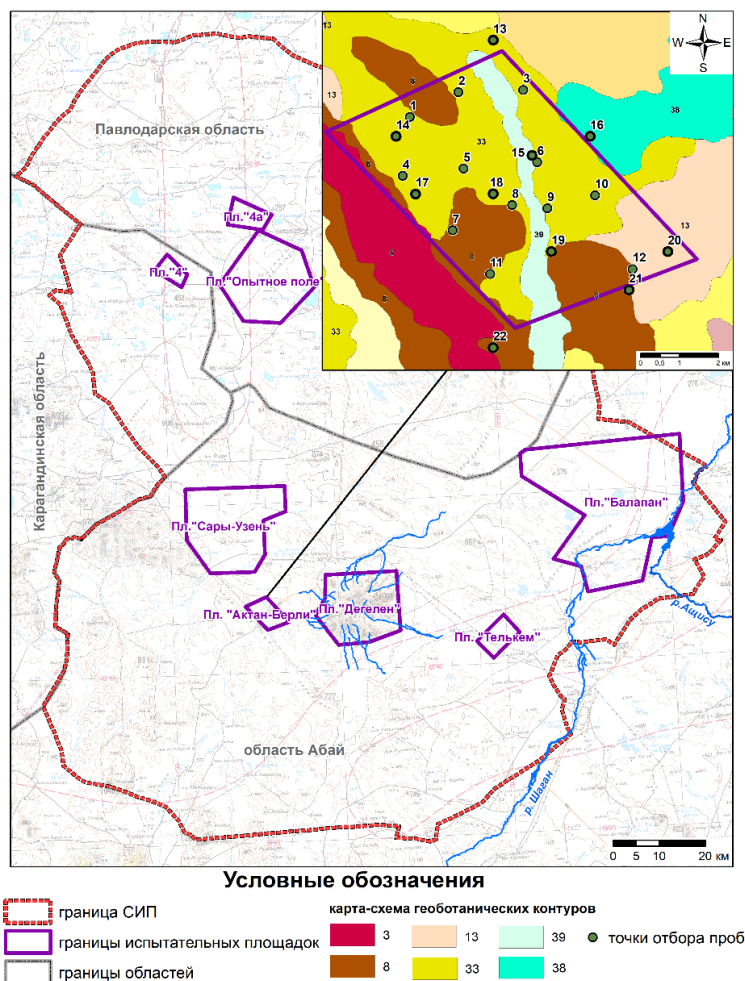


Рисунок 1. Расположение площадки «Актан-Берли» на территории СИП, точки отбора проб и распределение геоботанических контуров

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение растительного покрова исследуемой территории проводилось отдельными методами геоботанического описания с выделением основных типов растительности, определением проективного покрытия и видового состава растений [9]. Измерения радиационных параметров – плотности потока β -частиц и мощности эквивалентной дозы (МЭД), необходимые для первичной оценки наличия радиоактивного загрязнения на исследуемой территории, выполнялись при проведении экспедиционных работ в соответствии со стандартными методиками [10].

Для оценки пространственного распределения ^3H в растительном покрове было заложено 12 исследовательских площадок – точки отбора проб с 1 по 12 (Рисунок 1). В качестве основного исследуемого вида растений выбрана полынь (*Artemisia gracilescens*), которая имеет повсеместное распространение и в условиях сухой степи является более показательной с точки зрения возможного содержания ^3H [11]. Отбор проводился с учетом элементов рельефа в поздний весенний период (май), отбирался прирост текущего года. Масса каждой пробы составляла 200-300 г. Все

образцы растительности были запечатаны в двойные полиэтиленовые пакеты (чтобы свести к минимуму контакт между образцом и окружающим воздухом) и затем заморожены.

Для определения содержания в растительном покрове естественных (^{40}K , ^{232}Th и ^{226}Ra) и искусственных (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$) радионуклидов, а также для определения параметров накопления данных радионуклидов в системе «почва-растение» было заложено 10 исследовательских площадок – точки отбора проб с 13 по 22 (рисунок 1). Участки для проведения исследований выбраны на основании данных о площадном распределении искусственных радионуклидов [12] и результатов измерений радиационных параметров (плотности потока β -частиц и МЭД) во время проведения экспедиционных работ. На каждой площадке произведен отбор надземной части растений (площадь отбора $\sim 1-2 \text{ м}^2$), а также пробы почвы для дальнейшего определения параметров накопления. Проба растений представляла собой смешанный образец степного разнотравья с приблизительно одинаковым доминированием ковыля (*Stipa capillata*, *S. sareptana*, *S. lessingiana*), типчака

(*Festuca valesiaca*) и полыни (*Artemisia gracilescens*, *A. frigida*). Почва отобрана методом «конверта» на глубину 5 см.

Подготовку проб и анализ по измерению удельной активности радионуклидов в пробах почвы и растений проводили в соответствии со стандартизованными методическими указаниями [13, 14, 15] на поверенном оборудовании. Содержание радионуклида ^3H в растениях определялось в свободной воде (ТСВ) и органической составляющей (ОСТ). Выделение свободной воды из растительных образцов для измерения активности ТСВ производили посредством специальной установки [16], при этом объем конденсата в среднем составлял 10–15 мл. После извлечения свободной воды пробы высушивали до постоянной массы и сжигали на установке «Sample Oxidizer» PerkinElmer, США. Масса сжигаемого образца составляла 1–2 г. В воде, полученной после сжигания сухого растительного образца, измеряли удельную активность ^3H методом жидкостно-сцинтилляционной спектроскопии с использованием спектрометра «QUANTULUS 1220» (Perkin Elmer, США). Определение удельной активности радионуклидов ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{137}Cs и ^{241}Am в пробах почв и растений проводили на гамма-спектрометре Canberra GX-2020, ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ – радиохимическим выделением с последующим измерением на бета-спектрометре TRI-CARB 2900 TR и альфа-спектрометре AlphaAnalyst, соответственно. Концентрацию радионуклидов в растениях определяли в золе, с последующим пересчетом на сухое вещество.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании результатов изучения растительного покрова построена карта-схема распределения геоботанических контуров и основных экосистем (рисунок 1). Установлено, что наибольшая площадь исследуемой территории представлена экосистемами древнеаллювиальных равнин (33), состоящими из комплекса сообществ: тонковатопольнно-типчакково-тырсыковых (*Stipa sareptana*, *Festuca valesiaca*, *Artemisia gracilescens*); кокепковых (*Atriplex cana*), чернополынных (*Artemisia paciflora*) на светло-каштановых солонцеватых почвах; ажрековых (*Aeluropus litoralis*), галофитных разнотравно-злаковых (*Puccinellia dolicholepis*, *L. angustus*, *Leymus paboanus*, *Saussurea amara*, *Limonium gmelinii*), шренковскополынных (*Artemisia schrenkiana*), кермековых (*Limonium gmelinii*) на луговых солончаках. Далее по площади распространения выделяются экосистемы высоких мелкосопочников. Чаще это группа сообществ на защепенных каштановых почвах склонов и шлейфов пологоувалистого мелкосопочника (8): полынно-типчакково-тырсовых (*Stipa capillata*, *Festuca valesiaca*, *Artemisia frigida*, *A. marschalliana*) с участием *Caragana pumila*, *Spiraea hypericifolia*; кустарниково-полынно-дерновиннозлаковых (*Stipa capillata*, *Festuca valesiaca*, *Artemisia frigida*, *A. Marschalliana*, *Caragana pumila*, *Spiraea hypericifolia*) с уча-

стием *Phlomis tuberosa*, *Galium ruthenicum*, *Gypsophila paniculata*; полынно-типчакково-тырсовых (*Stipa capillata*, *Festuca valesiaca*, *Artemisia frigida*, *A. marschalliana*), иногда с участием *Ceratoides papposa*; группировки с *Artemisia austriaca*, *Eringium planum*, *Gypsophila paniculata*, *Acroptylon repens*, *Chenopodium urbicum*, *Psathyrostachis juncea*, *Ceratocarpus arenarius* на нарушенных участках. На юго-востоке территория также представлена следующими сериями сообществ (13): аяниево-дерновиннозлаково-холоднополынных (*Artemisia frigida*, *Stipa lessingiana*, *Festuca valesiaca*, *Ajania fruticulosa*, *Ephedra distachya*, *Veronica pinnata*, *Patrinia intermedia*) по вершинам, сублессингиановопольнно-типчакковых (*Festuca valesiaca*, *Artemisia sublessingiana*) со *Spiraea hypericifolia*, сублессингиановопольнно-киргизскоковыльных (*Stipa kirghisorum*, *Artemisia sublessingiana*) с *Caragana pumila* и *Spiraea hypericifolia* с участием *Veronica pinnata*, *Potentilla acaulis*, *Dianthus rigidus* по склонам и межсопочным степным понижениям. На западе исследуемая территория граничит с экосистемами низкогорий [3].

Небольшую центральную часть площадки «Актан-Берли» занимают экосистемы современных аллювиальных равнин, включающих ряд сообществ (39): однолетнесолянковых (*Salicornia europaea*, *Suaeda prostrata*, *Suaeda heterophylla*) → приморско-подорожниковых (*Plantago maritima*) → галофитно-разнотравных (*Plantago salsa*, *Saussurea salsa*, *Rumex marschallianus*, *Glax maritima*, *Limonium gmelinii*) → галофитнозлаковых (*Aeluropus litoralis*, *Puccinellia dolicholepis*, *Leymus paboanus*) → галофитнополынных (*Artemisia schrenkiana*, *A. nitrosa*) → галофитно-полукустарничковых (*Halimione verrucifera*, *Camphorosma monspeliaca*, *Limonium suffruticosum*) → галофитнокустарничковых (*Atriplex cana*, *Suaeda physophora*, *Nitraria sibirica*, *Tamarix hispida*) на солончакватых и солонцеватых почвах лугового ряда; полынно-дерновиннозлаковых (*Stipa sareptana*, *Festuca valesiaca*, *Psathyrostachys juncea*, *Artemisia gracilescens*, *A. frigida*) на остепняющихся луговых почвах в сочетании с комплексом чернополынно-биюргуново-тасбиюргуновых (*Nanophyton erinaceum*, *Anabasis salsa*, *Artemisia pauciflora*) на эродированных солонцеватых почвах озерных террас. С востока также примыкают ряды сообществ (38): тростниковых (*Phragmites australis*) на лугово-болотных почвах → солеросово-подорожниковых (*Plantago tenuiflora*, *Salicornia europaea*) → разнотравно-злаковых (*Aeluropus litoralis*, *Puccinellia tenuissima*, *Saussurea robusta*, *Limonium coralloides*) → злаково-разнотравных (*Inula caspica*, *Plantago maritima*, *Cirsium setosum*, *Leymus paboanus*, *Hordeum bogdanii*) на засоленном песчаном русловом аллювии → разнотравных (*Hysopus macranthus*, *Cynanchum sibiricum*, *Lagohilus pungens*, *Veronica incana*) → курчавковых (*Atraphaxis frutescens*) на песчано-галечниковых руслах временных водотоков.

**ИЗУЧЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И СОДЕРЖАНИЯ В НЕМ РАДИОНУКЛИДОВ
НА ПЛОЩАДКЕ «АКТАН-БЕРЛИ»**

Измерения радиометрических параметров показали, что плотность потока β -частиц на исследуемой территории составляет $<0,10$ част/(см²·мин), мощность эквивалентной дозы гамма-излучения на поверхности почвы варьирует в пределах от 0,10 до 0,26 мкЗв/ч (таблицы 1 и 2).

Содержание в растительном покрове радионуклида ³H оказалось ниже предела используемого аппаратно-методического обеспечения: ТСВ – <8 Бк/кг, ОСТ – <7 Бк/кг (таблица 1).

Значения удельной активности естественных радионуклидов ⁴⁰K, ²³²Th и ²²⁶Ra в отобранных пробах почв и растений представлены в таблице 2. Для оценки параметров накопления радионуклидов в растениях из почвы рассчитаны коэффициенты накопления (Кн) – отношение удельной активности в растениях к удельной активности в почве (таблица 2). Так, содержание ⁴⁰K в растениях ниже, чем в почвах – Кн превышают единицу (0,11-0,80). При этом диапазон значений концентрации ⁴⁰K в растительности изменяется в довольно широких пределах – от 55 до 520 Бк/кг.

Торий не является биогенным элементом и его Кн всегда ниже единицы. Согласно исследованиям [17] пороговая концентрация тория в наземных растениях находится в пределах от 10⁻⁴ до 10⁻² мг/кг, что связано с наличием биологического барьера, не позволяющего проникать в надземные органы растений этого элемента более определенного количества. В пределах исследуемой территории содержание ²³²Th в надземной части растений изменяется от $<0,9$ до

2,7 Бк/кг, значение Кн – не превышают 0,066.

Подвижность ²²⁶Ra в почвах более значительна [18]. Концентрация ²²⁶Ra в растениях в большинстве случаев находится ниже предела обнаружения аппаратно-методического обеспечения, в единичном случае составляет 2,8 Бк/кг. Ra не имеет биологического барьера, в отличие от Th, поэтому его Кн растениями могут быть больше единицы (Кн $>$ 1). Однако, для исследуемой территории Кн ²²⁶Ra растениями не превышают 0,12. Причина, по которой они могут быть меньше, по-видимому, заключается в недостаточности влаги в почвах. Определяющим фактором поведения радия в экосистеме почва-растение является близость химических свойств ²²⁶Ra и биогенного элемента Са. Но поскольку содержание Са в золе растений (вместе с калием и кремнием) велико – от 60 до 90% [19], следовательно, доля ²²⁶Ra по сравнению с величиной Са + Ва в растворе незначительна. Величины Кн радия пропорциональны содержанию доступных для растений подвижных и обменных его форм в почвах.

Касательно содержания естественных радионуклидов ⁴⁰K, ²³²Th и ²²⁶Ra в почвах при максимальных значениях 1100 Бк/кг, 77 Бк/кг и 34 Бк/кг, соответственно, можно отметить, что в целом оно не превышает максимальных значений для почв Казахстана (⁴⁰K – 1200, ²³²Th – 220, ²²⁶Ra – 120 Бк/кг) [20], что в свою очередь говорит об отсутствии каких-либо геохимических аномалий.

Таблица 1. Результаты полевой радиометрии и содержание ³H (ТСВ и ОСТ) в растительном покрове

Точка отбора	β , част/(мин·см ²)	МЭД, мкЗв/ч	Удельная активность ³ H, Бк/кг		Точка отбора	β , част/(мин·см ²)	МЭД, мкЗв/ч	Удельная активность ³ H, Бк/кг	
			НТО	ОСТ				ТСВ	ОСТ
1	<10	0,16	<8	<7	7	<10	0,12	<8	<7
2	<10	0,12	<8	<7	8	<10	0,20	<8	<7
3	<10	0,10	<8	<7	9	<10	0,12	<8	<7
4	<10	0,11	<8	<7	10	<10	0,10	<8	<7
5	<10	0,19	<8	<7	11	<10	0,10	<8	<7
6	<10	0,10	<8	<7	12	<10	0,25	<8	<7

Таблица 2. Результаты полевой радиометрии, удельная активность естественных радионуклидов ⁴⁰K, ²³²Th и ²²⁶Ra в отобранных пробах почв и растений, значения Кн

Точка отбора	β , част/(мин·см ²)	МЭД, мкЗв/ч	Удельная активность, Бк/кг						Кн		
			⁴⁰ K		²³² Th		²²⁶ Ra		⁴⁰ K	²³² Th	²²⁶ Ra
			растения	почва	растения	почва	растения	почва			
13	<10	0,16	290±60	630±130	<2,7	31±6	<1,5	<4	0,46	<0,087	—
14	<10	0,12	240±50	640±130	1,2±0,2	34±7	<0,6	8,5±1,9	0,38	0,035	<0,071
15	<10	0,13	440±90	750±150	<1,4	31±6	<0,7	—	0,59	<0,045	—
16	<10	0,15	87±17	680±140	0,9±0,2	31±6	<0,5	17±3	0,13	0,029	<0,029
17	<10	0,15	520±103	650±130	<0,9	29±6	<0,5	<3	0,80	<0,031	—
18	<10	0,19	500±100	720±140	<1,3	33±7	<0,8	15±3	0,69	<0,039	<0,053
19	<10	0,26	370±70	1100±200	2,5±0,5	61±12	2,8±0,6	23±5	0,34	0,041	0,12
20	<10	0,14	78±15	720±140	2,7±0,25	40±8	<1,3	7,3±1,5	0,11	0,066	<0,18
21	<10	0,17	55±11	1100±200	2,1±0,4	77±15	<0,7	34±7	0,05	0,027	<0,021
22	<10	0,11	340±70	580±120	<1,5	15±3	<0,9	<4,4	0,59	<0,10	—

**ИЗУЧЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И СОДЕРЖАНИЯ В НЕМ РАДИОНУКЛИДОВ
НА ПЛОЩАДКЕ «АКТАН-БЕРЛИ»**

Таблица 3. Удельная активность искусственных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ в отобранных пробах почв и растений, значения Кн

Точка отбора	Удельная активность, Бк/кг								Кн			
	^{137}Cs		^{90}Sr		^{241}Am		$^{239+240}\text{Pu}$		^{137}Cs	^{90}Sr	^{241}Am	$^{239+240}\text{Pu}$
	растения	почва	растения	почва	растения	почва	растения	почва				
13	<0,5	75±15	6,7±1,0	5,8±0,9	<0,2	3,0±0,6	<0,06	21±8	<0,0067	1,2	<0,077	<0,0029
14	0,7±0,1	48±10	4,9±0,8	4,5±0,9	<0,1	<1,2	<0,2	28±9	0,015	1,1	—	<0,0071
15	0,6±0,1	30±6	4,1±1,2	5,1±0,9	<0,2	<0,7	<0,06	7,6±2,4	0,02	0,8	—	<0,0079
16	<0,4	32±6	4±1	5,7±1,0	<0,1	<0,8	<0,08	8,4±2,4	<0,013	0,7	—	<0,0095
17	1,1±0,2	50±10	3,5±1,0	4,7±0,9	<0,1	<2,3	<0,2	19±8	0,022	0,75	—	<0,011
18	0,8±0,2	35±7	6,6±1,0	7±1	<0,2	54±11	<0,2	10±4	0,023	0,94	<0,0032	<0,02
19	<0,4	60±12	5,5±0,9	9,7±1,4	<0,1	3,8±0,7	<0,07	9,8±4,0	<0,0067	0,57	<0,026	<0,0071
20	<0,6	28±6	<0,7	3,8±1,0	<0,2	<1,8	<0,05	6,8±3,9	<0,021	<0,18	—	<0,0074
21	<0,22	44±9	2,4±0,6	9,5±1,4	<0,1	2,2±0,6	<0,03	20±13	<0,005	0,25	<0,046	<0,0015
22	<0,29	50±10	5,4±0,8	6,7±1,0	<0,1	25±5	0,3±0,1	150±23	<0,0058	0,81	—	0,002

В таблице 3 представлены значения удельной активности искусственных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ в отобранных пробах почв и растений, а также Кн (таблица 3).

Как видно из таблицы 3, значения удельной активности радионуклида ^{137}Cs в растениях в большинстве случаев оказались ниже предела обнаружения используемого аппаратно-методического обеспечения, при этом, его количественное содержание изменяется от 0,6 до 1,1 Бк/кг. Среднее значение Кн ^{137}Cs составило $0,020 \pm 0,002$ (n=4). Диапазон удельной активности ^{90}Sr в растениях изменяется от <0,7 до 6,7 Бк/кг, Кн ^{90}Sr составляет $0,78 \pm 0,09$ (n=9). Содержание радионуклидов трансуранового ряда (^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$) в пробах растений в абсолютном большинстве случаев количественно установлено не было. Исключение составляет точка 22, расположение которой находится несколько за пределами официальной границы площадки «Актан-Берли», Кн $^{239+240}\text{Pu}$ в данном случае составил 0,002.

Полученные Кн ^{137}Cs соответствуют значениям, ранее полученным для большей части территории СИП – условно «фоновых» территорий и «следов» радиоактивных выпадений [7], при этом на порядок ниже значений, полученных для пастбищ по данным МАГАТЭ [21]. Более серьезного внимания заслуживают Кн ^{90}Sr , которые соответствуют значениям Кн данного радионуклида, полученным ранее, для участков радиоактивных водотоков и территории испытания боевых радиоактивных веществ [7] и максимально близки к данным МАГАТЭ [21]. Установленные различия, прежде всего, могут быть связаны с особенностями радиоактивного загрязнения исследуемой территории и могут указывать на более доступные формы нахождения ^{90}Sr в почве, обусловленные характером проведенных гидроядерных испытаний.

На основании результатов о содержании естественных и искусственных радионуклидов в почвенно-растительном покрове проведена оценка дозовых нагрузок на биоту.

Мощность дозы облучения растения складывается из мощности дозы внутреннего и внешнего облучения. Первая составляющая обусловлена радионуклидами, непосредственно содержащимися в растениях, вторая составляющая формируется за счет радионуклидов, находящихся в почве.

Суммарная мощность дозы облучения j -го референтного объекта D_j определяется путем суммирования мощностей дозы внешнего и внутреннего облучения этого объекта $D_{i,j}$ от всех рассматриваемых радионуклидов i :

$$D_j = \sum_i D_{i,j}^{\text{внутр}} + D_{i,j}^{\text{внеш}}.$$

В общем случае мощность дозы облучения растения рассчитывается согласно выражению:

$$D = A \times d,$$

где A – удельная активность радионуклида в растениях или почве в случае расчета мощности дозы внутреннего и внешнего облучения, соответственно, (Бк/кг); d – дозовый коэффициент внутреннего или внешнего облучения растения, (мкГр/сутки)/(Бк/кг).

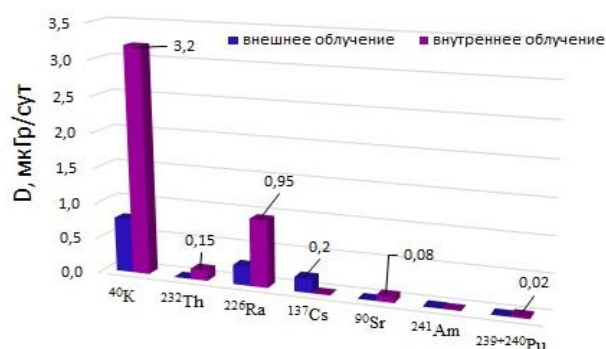


Рисунок 2. Мощность дозы облучения растений естественными и искусственными радионуклидами

Значения всех необходимых коэффициентов для расчета мощности доз внутреннего и внешнего облучения выбраны для объекта «дикая трава» приведены

в публикации МКРЗ №108 [22]. Входными параметрами расчета являлись уровни концентрации естественных и искусственных радионуклидов в почве и растениях.

В результате проведенных расчетов установлено, что мощность дозы облучения растений, произрастающих на территории площадки «Актан-Берли» от естественных радионуклидов находится в диапазоне от 1,4 до 4,3 мкГр/сут. Основной вклад в дозовую нагрузку растений от естественных радионуклидов вносит доза внутреннего облучения от радионуклида ^{40}K (~70%). Мощность дозы от техногенных радионуклидов варьирует от 0,076 до 0,28 мкГр/сут, где основным дозообразующим радионуклидом является ^{137}Cs (~66%). Следует отметить, что мощность дозы внутреннего облучения от техногенных радионуклидов формируется за счет ^{90}Sr (~76%). Суммарная мощность дозы облучения растений от внешнего и внутреннего облучения составила 4,6 мкГр/сут, что не превышает значений мощности дозы хронического облучения для наземных растений и находится на уровне естественного радиационного фона [23, 24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований установлено, что территория площадки «Актан-Берли» представлена экосистемами высоких мелкосопочников, на западе граничащих с экосистемами низкогорий, а также экосистемами древнеаллювиальных и современных аллювиальных равнин. Анализ лабораторных данных показал, что содержание радионуклида ^3H (ТСВ, ОСТ) в растительном покрове на исследуемой территории незначительно и в абсолютном большинстве случаев находится ниже предела обнаружения используемого аппаратно-методического обеспечения (<8 Бк/кг). Содержание естественных радионуклидов ^{40}K , ^{232}Th и ^{226}Ra в растениях не превышает их содержания в почве, а максимальные значения в почве (^{40}K – 1100, ^{232}Th – 77, ^{226}Ra – 34 Бк/кг) являются типичными для почв Казахстана (^{40}K – 1200, ^{232}Th – 220, ^{226}Ra – 120 Бк/кг), что в свою очередь говорит об отсутствии каких-либо геохимических аномалий. Диапазон удельной активности ^{90}Sr в растениях изменяется от <0,7 до 6,7 Бк/кг, ^{137}Cs – от <0,6 до 1,1 Бк/кг, содержание ^{241}Am и $^{239+240}\text{Pu}$ в растениях в абсолютном большинстве случаев оказались ниже предела обнаружения используемого аппаратно-методического обеспечения (<0,2 Бк/кг). При этом исходя из полученных результатов оценки мощности дозы облучения растений можно сказать, что значения находятся в пределах нижнего порогового уровня «предельной дозы» по разным литературным данным. А так как вычисленные мощности доз для растений ниже принятых международных критериев, то полученный результат свидетельствует об отсутствии угроз (опасности) для состояния экосистемы. В целом же содержание радионуклидов в растительном покрове на территории площадки «Актан-Берли» находится существенно ниже предельно-

допустимых уровней радиоактивного загрязнения кормовых растений и не представляет опасности при использовании исследуемой территории в хозяйственной деятельности.

Данные исследования выполнены в рамках программно-целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан BR21882086 «Разработка устойчивого управления земельными ресурсами и водными объектами на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона», а также РБП 036.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ядерные испытания в СССР: Цели. Общие характеристики. Организация ядерных испытаний СССР. Первые ядерные испытания / под. рук. В.Н. Михайлова; состав ред. И. А. Андрюшин, В. В. Богдан, С. А. Зеленцев [и др.]. – Т. 1. – Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 1997. – 286 с.
2. Ларионова, Н.В. Особенности накопления искусственных радионуклидов степными растениями на площадке «Опытное поле» бывшего СИП/ Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, А.Е. Кундузбаева [и др.]. // Вестник НЯЦ РК. – 2011. – Вып. 3(47). – С. 120–124. – Библиогр.: с. 124.
3. Ларионова, Н.В. Параметры накопления радионуклидов растениями в местах испытания боевых радиоактивных веществ на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона/ Н.В. Ларионова, С.Н. Лукашенко, Н.И. Санжарова // Радиация и риск. – 2013. – Т. 22, № 4 – С. 85–65. – Библиогр.: с. 65.
4. Polivkina, Ye.N. Assessment of the tritium distribution in the vegetation cover in the areas of underground nuclear explosions at the Semipalatinsk test site / Ye.N. Polivkina, N.V. Larionova, S.N. Lukashenko [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. – 2021. – Vol. 237. – 106705. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106705>
5. Ларионова, Н.В. Накопление радионуклидов Cs-137 и Sr-90 растениями на участке радиоактивных выпадений на территории Семипалатинского испытательного полигона/ Н.В. Ларионова, П.Е.Кривицкий, А.В. Топова [и др.]. // Вестник НЯЦ РК. – 2022. – Вып. 3 (91). – С. 26–30.– Библиогр.: с. 29–30. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-3-26-30>
6. Larionova, N.V. Transfer parameters of radionuclides from soil to plants at the area of craters produced by underground nuclear explosions at the Semipalatinsk test site/ N.V. Larionova, S.N. Lukashenko, O.N. Lyakhova [et al.]. // Journal of Environmental Radioactivity. – 2021. – Vol. 237 (1–2). – 106684. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106684>
7. Larionova, N.V. Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the Semipalatinsk Test Site/ N.V. Larionova, S.N. Lukashenko, A.M. Kabdyrakova [et al.]. // Journal of Environmental Radioactivity. – 2018. – Vol. 186. – P. 63–70.
8. Янкаускас А.Б. Влияние трития на морфо-анатомическую структуру растений вида тростник обыкновенный (*Phragmites australis*)/ А.Б. Янкаускас, Н.В. Ларионова, А.Н. Шатров // Радиация и риск. – 2021. – Т. 30, № 2. – С. 133–145. – Библиогр.: с. 144–145. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2021-30-2-133-145>

9. Полевая геоботаника: в 5 т. / АН СССР. Ботан. ин-т им. В. Л. Комарова; под общ. ред. Е.М. Лавренко, А.А. Корчагина. – М., Ленинград: Наука, 1959-1976. (Т. 1, 1959. – 444 с.; Т. 2, 1960. – 500 с.; Т. 3, 1964. – 530 с.; Т. 4, 1972. – 336 с.; Т. 5, 1976. – 320 с.).
10. Инструкция и методические указания по наземному обследованию радиационной обстановки на загрязненной территории: утв. Межведомственной комиссией по радиационному контролю природной среды при Госкомгидромете СССР. – М., 1989.
11. Larionova, N.V. Plants as indicators of tritium concentration in ground water at the Semipalatinsk test site / N.V. Larionova, S.N. Lukashenko, O.N. Lyakhova [et al.]. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2017. – Vol. 177. – P. 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.032>
12. Республиканская бюджетная программа 036 «Развитие атомных и энергетических проектов», подпрограмма 101 «Обеспечение радиационной безопасности на территории Республики Казахстан», мероприятие 1 «Обеспечение безопасности бывшего Семипалатинского испытательного полигона»: отчет по 036 программе (информац.) / филиал Ин-т. рад. безоп. и экологии РГП НЯЦ РК; рук. работ Умаров М.А.; уч. секретарь Ларионова Н.В. – Курчатов, 2019. – 115. – Библиогр.: с. 114–115.
13. КР СТ ISO 9698-2022. Качество воды. Тритий. Метод определения активности с помощью жидкостно-сцинтилляционного счета. – Введ. 2023-07-01. – Астана: Госстандарт, 2022. – 29 с.
14. Активность радионуклидов в объемных образцах. Методика выполнения измерений на гамма-спектрометре: МИ 2143-91. – Введ. 1998-06-02. – Рег. № 5.06.001.98. – М.: НПО ВНИИФТРИ, 1991. – 17 с.
15. Методика определения содержания искусственных радионуклидов плутония-(239+240), стронция-90 в объектах окружающей среды (почвах, грунтах, донных отложениях и растениях)». – Алматы: РГП ИЯФ МЭ РК, 2021. – 26 с.
16. Инновационный патент РК. № 29721. Установка для извлечения воды из образцов/ Лукашенко С.Н., Ларионова Н.В., Зарембо В.П.; заявитель и патентообладатель РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан»; опубл. 15.04.2015, Бюл. № 4. – 4 с.: ил.
17. Титаева, Н.А. «Ядерная геохимия» / Н.А. Титаева. – М., 2000. – С. 185, 186, 202, 207.
18. Куликов, И.В. Радиоэкология почвенно-растительного покрова / И.В. Куликов, И.В. Молчанова, Е.Н. Караваева. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990. – С. 40.
19. Полузеров, Н.А. Геохимия и минералогия пустынно-степных почв Казахстана/ Н.А. Полузеров, И.А. Ассинг, Н.П. Андреева. – Алматы: Наука, 1975. – С. 117.
20. Учебно-методическое руководство по радиоэкологии и обращению с радиоактивными отходами для условий Казахстана: проект К-112 (МНТЦ). – Алматы: ОАО «Волковгеология», 2002. – 304 с.
21. Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments // IAEA TECDOC-1616. – Vienna: IAEA, 2009. – 163 p.
22. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants // ICRP. – 2008. – Vol. 38, No. 4–6. – ICRP Publication 108. – 344 p.
23. Andersson, P. Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the environment: proposed levels, underlying reasoning and recommendations/ P. Andersson, K. Beaugelin-Seiller, N. Beresford [et al.] // PROTECT Deliverable 5. EC contract number: 036425 (FI6R). – 2008. – 112 p.
24. Крышев, И.И. Радиационная безопасность окружающей среды: необходимость гармонизации российских и международных нормативно-методических документов с учетом требований федерального законодательства и новых международных основных норм безопасности ОНБ-2011 / И.И. Крышев, Т.Г. Сазыкина // *Радиация и риск*. – 2013. – Т. 22, № 1. – С. 47–61.

REFERENCES

1. Yadernye ispytaniya v SSSR: Tseli. Obshchie kharakteristiki. Organizatsiya yadernykh ispytaniy SSSR. Pervyye yadernye ispytaniya / pod. ruk. V.N. Mikhaylova; sostav red. I. A. Andryushin, V. V. Bogdan, S. A. Zelentsev [i dr.]. – Vol. 1. – Sarov: RFYaTs – VNIIEF, 1997. – 286 p.
2. Larionova, N.V. Osobennosti nakopleniya iskusstvennykh radionuklidov stepnymi rasteniyami na ploshchadke “Opytnoe pole” byvshego SIP/ N.V. Larionova, S.N. Lukashenko, A.E. Kunduzbaeva [i dr.]. // *Vestnik NYaTs RK*. – 2011. – Issue 3(47). – P. 120–124. – Bibliogr.: p. 124.
3. Larionova, N.V. Parametry nakopleniya radionuklidov rasteniyami v mestakh ispytaniya boevykh radioaktivnykh veshchestv na territorii byvshego Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona/ N.V. Larionova, S.N. Lukashenko, N.I. Sanzharova // *Radiatsiya i risk*. – 2013. – Vol. 22, No. 4 – P. 85–65. – Bibliogr.: p. 65.
4. Polivkina, Ye.N. Assessment of the tritium distribution in the vegetation cover in the areas of underground nuclear explosions at the Semipalatinsk test site / Ye.N. Polivkina, N.V. Larionova, S.N. Lukashenko [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2021. – Vol. 237. – 106705. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106705>
5. Larionova, N.V. Nakoplenie radionuklidov Cs-137 i Sr-90 rasteniyami na uchastke radioaktivnykh vypadeniy na territorii Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona/ N.V. Larionova, P.E. Krivitskiy, A.V. Toporova [i dr.]. // *Vestnik NYaTs RK*. – 2022. – Issue 3(91). – P. 26–30. – Bibliogr.: p. 29–30. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-3-26-30>
6. Larionova, N.V. Transfer parameters of radionuclides from soil to plants at the area of craters produced by underground nuclear explosions at the Semipalatinsk test site/ N.V. Larionova, S.N. Lukashenko, O.N. Lyakhova [et al.]. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2021. – Vol. 237 (1–2). – 106684. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106684>
7. Larionova, N.V. Transfer of radionuclides to plants of natural ecosystems at the Semipalatinsk Test Site/ N.V. Larionova, S.N. Lukashenko, A.M. Kabdyrakova [et al.]. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2018. – Vol. 186. – P. 63–70.
8. Yankauskas A.B. Vliyanie tritiya na morfo-anatomicheskuyu strukturu rasteniy vida trostnik obyknovenny (Phragmites australis)/ A.B. Yankauskas, N.V. Larionova, A.N. Shatrov // *Radiatsiya i risk*. – 2021. – Vol. 30, No. 2. – P. 133–145. – Bibliogr.: p. 144–145. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2021-30-2-133-145>
9. Polevaya geobotanika: v 5 t. / AN SSSR. Botan. in-t im. V. L. Komarova; pod obshch. red. E.M. Lavrenko, A.A. Korchagina. – М., Ленинград: Nauka, 1959–1976. (Т. 1,

1959. – 444 p.; Т. 2, 1960. – 500 p.; Т. 3, 1964. – 530 p.; Т. 4, 1972. – 336 p.; Т. 5, 1976. – 320 p.).
- Instruktsiya i metodicheskie ukazaniya po nazemnomu obsledovaniyu radiatsionnoy obstanovki na zagryaznennoy territorii: utv. Mezhevdomstvennoy komissiey po radiatsionnomu kontrolyu prirodnoy sredy pri Goskomgidromete SSSR. – Moscow, 1989.
 - Larionova, N.V. Plants as indicators of tritium concentration in ground water at the Semipalatinsk test site/ N.V. Larionova, S.N. Lukashenko, O.N. Lyakhova [et al.]. // Journal of Environmental Radioactivity. – 2017. – Vol. 177. – P. 218–224.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.032>
 - Respublikanskaya byudzhethnaya programma 036 “Razvitiye atomnykh i energeticheskikh proektov”, podprogramma 101 «Obespechenie radiatsionnoy bezopasnosti na territorii Respubliki Kazakhstan», meropriyatie 1 “Obespechenie bezopasnosti byvshego Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona”: otchet po 036 programme (informat.) / filial In-t. rad. bezop. i ekologii RGP NYaTs RK; ruk. rabot Umarov M.A.; uch. sekretar' Larionova N.V. – Kurchatov, 2019. – 115. – Bibliogr.: p. 114–115.
 - QR ST ISO 9698-2022. Kachestvo vody. Tritiy. Metod opredeleniya aktivnosti s pomoshch'yu zhidkostno-stsintillyatsionnogo scheta. – Vved. 2023-07-01. – Astana: Gosstandart, 2022. – 29 p.
 - Aktivnost' radionuklidov v ob'emnykh obraztsakh. Metodika vypolneniya izmereniy na gamma-spektrometre: MI 2143-91. – Vved. 1998-06-02. – Reg. No. 5.06.001.98. – Moscow: NPO VNIIFTRI, 1991. – 17 p.
 - Metodika opredeleniya sodержaniya iskusstvennykh radionuklidov plutoniya-(239+240), strontsiya-90 v ob'ektakh okruzhayushchey sredy (pochvakh, gruntakh, donnykh otlozheniyakh i rasteniyakh). – Almaty: RGP IYaF ME RK, 2021. – 26 p.
 - Innovatsionnyy patent RK. No. 29721. Ustanovka dlya izvlecheniya vody iz obraztsov/ Lukashenko S.N., Larionova N.V., Zarembo V.P.; zayavitel' i patento-obladatel' RGP «Natsional'nyy yadernyy tsentr Respubliki Kazakhstan»; opubl. 15.04.2015, Byul. No. 4. – 4 p.: il.
 - Titaeva, N.A. «Yadernaya geokhimiya»/ N.A. Titaeva. – Moscow, 2000. – P. 185, 186, 202, 207.
 - Kulikov, I.V. Radioekologiya pochvenno-rastitel'nogo pokrova / I.V. Kulikov, I.V. Molchanova, E.N. Karavaeva. – Sverdlovsk: UrO AN SSSR, 1990. – P. 40.
 - Poluzerov, N.A. Geokhimiya i mineralogiya pustynno-stepnykh pochv Kazakhstana / N.A. Poluzerov, I.A. Assing, N.P. Andreeva. – Almaty: Nauka, 1975. – P. 117.
 - Uchebno-metodicheskoe rukovodstvo po radioekologii i obrashcheniyu s radioaktivnymi otkhodami dlya usloviy Kazakhstana: proekt K-112 (MNTTs). – Almaty: OAO “Volkovgeologiya”, 2002. – 304 p.
 - Quantification of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments // IAEA TECDOC-1616. – Vienna: IAEA, 2009. – 163 p.
 - Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants // ICRP. – 2008. – Vol. 38, No. 4–6. – ICRP Publication 108. – 344 p.
 - Andersson, P. Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the environment: proposed levels, underlying reasoning and recommendations / P. Andersson, K. Beaugelin-Seiller, N. Beresford [et al.] // PROTECT Deliverable 5. EC contract number: 036425 (F16R). – 2008. – 112 p.
 - Kryshev, I.I. Radiatsionnaya bezopasnost' okruzhayushchey sredy: neobkhodimost' garmonizatsii rossiyskikh I mezhdunarodnykh normativno-metodicheskikh dokumentov s uchetom trebovaniy federal'nogo zakonodatel'stva i novykh mezhdunarodnykh osnovnykh norm bezopasnosti ONB-2011 / I.I. Kryshev, T.G. Sazykina // Radiatsiya i risk. – 2013. – Vol. 22, No. 1. – P. 47–61.

«АКТАН-БЕРЛІ» АЛАҢЫНДА ӨСІМДІК ЖАМЫЛҒЫСЫН ЖӘНЕ ОНДАҒЫ РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ҚҰРАМЫН ЗЕРТТЕУ

**Н. В. Ларионова^{1*}, А. В. Топорова¹, В. В. Полевик², Е. Н. Поливкина¹, П. Е. Кривицкий¹,
Л. В. Тимонова¹, Л. Ф. Субботина¹, М. Т. Абишева¹, В. Н. Монаенко¹, А. О. Айдарханов¹**

¹ ҚР ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Қурчатов, Қазақстан

² Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Қазақстан

*Байланыс үшін E-mail: larionova@nnc.kz

Мақалада «Ақтан-Берлі» алаңындағы өсімдік жамылғысының сипаттамасы, оның ішінде табиғи (⁴⁰K, ²³²Th, ²²⁶Ra) және жасанды (¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ³H) радионуклидтердің құрамы келтірілген. Алаңның өсімдік жамылғысы батыста төмен таулы экожүйелермен, сондай-ақ ежелгі аллювиалды және қазіргі аллювиалды жазықтармен шектесетін биік ұсақ шоқылардың экожүйелерімен ұсынылатыны анықталды. ³H радионуклидтің бос судағы (ТСВ) және органикалық құрамдас бөлігіндегі (ОСТ) құрамы пайдаланылатын аппаратуралық-әдістемелік қамтамасыз етуді анықтау шегінен төмен (<8 Бк/кг). Табиғи радионуклидтердің шоғырлануы, атап айтқанда Қазақстан топырақтарына тән болып табылады. Өсімдіктердегі ⁹⁰Sr меншікті белсенділік диапазоны <0,7-ден 6,7 Бк/кг-ға дейін, ¹³⁷Cs – <0,6-дан 1,1 Бк/кг-ға дейін, ²⁴¹Am және ²³⁹⁺²⁴⁰Pu құрамы – көп жағдайда абсолютті түрде анықтау шегінен төмен (<0,2 Бк/кг). Өсімдіктердің сәулелену дозасының қуат мәндері қабылданған халықаралық критерийлерден төмен. Жалпы, «Ақтан-Берлі» алаңының аумағындағы өсімдік жамылғысындағы радионуклидтердің құрамы жемшөп өсімдіктерінің радиоактивті ластануының шекті рұқсат етілген деңгейінен едәуір төмен және зерттеліп жатқан аумақты шаруашылық қызметте пайдалану кезінде қауіп төндірмейді.

Түйін сөздер: ССП, «Ақтан-Берлі», өсімдік жамылғысы, радионуклидтер.

**STUDY OF THE PLANT COVER AND CONTENTS
OF RADIONUCLIDES AT THE AKTAN-BERLI SITE**

N. V. Larionova^{1*}, A. V. Toporova¹, V. V. Polevik², E. N. Polivkina¹, P. E. Krivitskiy¹,
L. V. Timonova¹, L. F. Subbotina¹, M. T. Abisheva¹, V. N. Monaenko¹, A. O. Aidarkhanov¹

¹ Branch “Institute of Radiation Safety and Ecology” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

² Shakarim University, Semey, Kazakhstan

*E-mail for contacts: larionova@nnc.kz

The article presents characteristics of the plant cover at the “Aktan-Berli” site including the content of natural (⁴⁰K, ²³²Th, ²²⁶Ra) and artificial (¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am, ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, ³H) radionuclides. It has been found that the plant cover of the site is represented by ecosystems of high Kazakh hammocks bordering on ecosystems of lowlands in the west and ecosystems of ancient alluvial and modern alluvial plains. The content of free-water ³H (FWT) and organic constituent (OBT) is below the detection limit of the methodological instrumentation in use (<8 Bq/kg). The concentration of natural radionuclides is typical, especially for Kazakhstani soil. The range of ⁹⁰Sr activity concentration in plants range from <0.7 to 6.7 Bq/kg, ¹³⁷Cs – from <0.6 to 1.1 Bq/kg, the content of ²⁴¹Am and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu are below the detection limit in most cases (<0,2 Bq/kg). Values of the radiation dose rate of plants are below the accepted international criteria. In general, the content of radionuclides in the plant cover of the “Aktan-Berli” site is significantly below the maximum permissible levels of radioactive contamination of forage plants posing no hazard when using the territory of interest for economic activities.

Keywords: STS, “Aktan-Berli”, plant cover, radionuclides.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-89-95>

УДК 004.42: 621.311.25: 614.876

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ШТАТНЫХ И АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ

М. К. Мукмушева¹, С. И. Спиридонов², Р. А. Микаилова², А. В. Топорова^{3*}

¹ РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан

² НИЦ «Курчатовский институт» ВНИИРАЭ, Москва, Россия

³ Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

*E-mail для контактов: toporova@nnc.kz

В статье приведен обзор и сравнение программных средств для прогнозирования радиационного воздействия на население при нормальной эксплуатации и в случае аварийной ситуации на АЭС. Рассмотрены основные характеристики, функциональные особенности, преимущества и недостатки программных пакетов RESRAD, CROM, PC-CREAM 08®, ESTE Annual Impacts, POM, ESTE, НОСТРАДАМУС, RECASS, RODOS. Выделены критерии оценки качества и эффективности программных средств. Обоснован оптимальный расчетный инструментарий, применимый для условий штатной работы АЭС (пакет CROM) и для аварийных ситуаций (система RODOS).

Ключевые слова: программное обеспечение, АЭС, нормальная эксплуатация, аварийная ситуация, годовая эффективная доза, мониторинг.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование и оценка фактического и потенциального радиационного воздействия атомных электростанций (АЭС) на население представляют собой важный аспект обеспечения безопасности и устойчивости ядерной энергетики. Программные средства, предназначенные для прогнозирования радиационных последствий в нормальных условиях эксплуатации АЭС и в случае аварийных ситуаций, играют ключевую роль в данном контексте. Эти инструменты позволяют оценить возможные риски для здоровья человека и состояния окружающей среды, обеспечивают прозрачность в информационном обмене и способствуют разработке эффективных стратегий безопасности.

В данной статье предлагается рассмотреть программные обеспечения для прогнозирования радиационного воздействия на население при нормальной эксплуатации и в случае аварийной ситуации на АЭС.

АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

К настоящему времени разработан ряд программных средств, предназначенных для оценки дозовых нагрузок на население при нормальной эксплуатации объектов ядерной энергетики. К ним относятся: RESRAD [1], CROM [2], PC-CREAM 08® [3], ESTE Annual Impacts [4], POM [5]. Также создан ряд программных пакетов для прогнозирования дозовых нагрузок на население в случае аварийных ситуаций на объектах ядерной энергетики: ESTE [6], НОСТРАДАМУС (в поздних версиях – POM) [5, 7], RECASS [8], JRODOS [9].

Программные средства имеют отличия по своим возможностям, точности и доступности, поэтому не-

обходимо определить наиболее подходящие и эффективные инструменты для прогнозирования радиационного воздействия и поддержки принятия решений в случае ядерной или радиационной аварии, а также для планирования и оптимизации реабилитационных мероприятий на загрязненных территориях.

В таблице 1 представлена информация о пяти программных средствах для оценки радиационного воздействия на население при штатной эксплуатации АЭС. Выполнен сравнительный анализ расчетных инструментов по их назначению, исходным данным, используемым моделям, функциональным особенностям, поддерживаемым платформам, техническим характеристикам и типу лицензии.

Назначение и основные функциональные возможности всех программных средств для радиологической оценки штатных выбросов АЭС в основном совпадают, но, при этом, имеются и различия. Так, RESRAD в качестве исходных данных использует характеристики загрязнения почвы, позволяя оценить распространение радиоактивных веществ из почвы в другие компоненты окружающей среды и по пищевым цепочкам. POM позволяет оценить дозовые нагрузки на население только от выбросов в атмосферу, в то время как CROM, PC-CREAM 08 и ESTE Annual Impacts позволяют рассчитать дозы также и от сбросов в водные объекты. ESTE Annual Impacts и POM характеризуются более сложными моделями распространения примесей в атмосфере и имеют ГИС-модули для графического представления полученных результатов, поэтому указанным программам требуется большой объем дискового пространства и оперативной памяти.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ШТАТНЫХ И АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ

Таблица 1. Характеристики программных средств для оценки радиационного воздействия на население при штатной эксплуатации АЭС

Программное средство	RESRAD	CROM	PC-CREAM 08	ESTE Annual Impacts	POM
Назначение	- оценка дозы облучения репрезентативного человека - оценка риска онкологических заболеваний	- оценка дозы облучения разных возрастных групп населения - оценка доз на биоту	- оценка индивидуальных доз облучения для 3-х возрастных групп населения - оценка коллективных доз	- оценка дозы облучения разных возрастных групп населения - оценка доз на биоту	- оценка дозы облучения разных возрастных групп населения для штатных и аварийных выбросов - оценка мощностей доз и интегральных доз облучения населения на отдельные органы
Исходные данные	- параметры загрязненной территории (направление, площадь загрязнения, координаты с-х территорий, домов, водных объектов) - концентрации радионуклидов в почве - коэффициенты распределения радионуклидов в компонентах окружающей среды - коэффициенты перехода радионуклидов в продукты растительного и животного происхождения, а также в рыбу и ракообразных	- характеристика источника выбросов в атмосферу и сбросов в водные объекты (размеры источника, активности радионуклидов) - расстояние от источника выброса до точки, где располагается детектор - метео-параметры и характеристика подстилающей поверхности - характеристики водных объектов - коэффициенты перехода радионуклидов в продукты растительного и животного происхождения, а также в рыбу и моллюсков - характеристики выращивания с.-х. культур и содержания с.-х. животных - особенности поведения населения - рационы питания населения для разных возрастных групп	- характеристика источника выбросов в атмосферу и сбросов в водные объекты (размеры источника, активности радионуклидов) - расстояние от источника выброса до точки, где располагается детектор - метео-параметры и характеристика подстилающей поверхности - характеристики водных объектов - коэффициенты перехода радионуклидов в продукты растительного и животного происхождения, а также в рыбу и моллюсков - характеристики выращивания с.-х. культур и содержания с.-х. животных - особенности поведения населения - рационы питания населения для разных возрастных групп	- географическая информация (карта местности, координаты, рельеф, характеристики водных объектов) - характеристика источника выбросов в атмосферу и сбросов в водные объекты (размеры источника, состав и активность) - метео-параметры - базы данных параметров миграции радионуклидов и региональных данных для пищевой цепочки - факторы поведения населения - рационы питания населения для разных возрастных групп	- географическая информация (карта местности, координаты, рельеф) - характеристика источника выбросов в атмосферу (размеры источника, состав и активность) - метеопараметры - особенности поведения населения - рационы питания населения для разных возрастных групп - базы данных параметров миграции радионуклидов и региональных данных для пищевой цепочки
Используемые модели распространения примесей в атмосфере	гауссова модель дисперсии	гауссова модель дисперсии	модель рассеяния гауссовского шлейфа	модель траектории облака, объединенная с гауссовой моделью дисперсии в горизонтальном направлении и с моделью, основанной на уравнении диффузии в вертикальном направлении	лагранжева траекторная стохастическая модель атмосферного переноса
Отличительные черты	- графическое представление расположения объектов в схематичном виде в декартовой системе координат - возможность включить расчет дозы от радона - коэффициенты перехода трития и углерода-14 в продукты питания рассчитываются программой самостоятельно	- дружелюбный интерфейс (программа проводит пользователя по цепочке вычислений без возможности совершить ошибку, пропустив какой-то шаг) - встроенная база данных имеет значения по умолчанию для некоторых входных параметров, что позволяет провести скрининговую оценку - в базе данных содержатся примеры расчетов из SRS-19, что позволяет освоить программу быстрее	- модели для трития и углерода-14 оценивают дозовую нагрузку от продуктов питания - большое количество параметров для водных объектов позволяют точнее моделировать распространение радиоактивных примесей в воде	- графическое представление пространственной информации - в программу загружаются базы данных региональных параметров, необходимых для оценки - программа формируется специально под предприятие ЯТЦ	- графическое представление пространственной информации - сложная модель распространения выброса позволяет подробнее моделировать атмосферный перенос на сотни километров - в программу можно загрузить базы данных региональных параметров, необходимых для оценки - оценка доз также проводится для отдельных органов - программа позволяет также выполнять оценку доз для аварийных сценариев
Поддерживаемые платформы	Windows	Windows	Windows	Windows	Windows
Технические характеристики:					
- частота процессора	> 2.8 ГГц	> 2.8 ГГц	> 2.8 ГГц	> 1 ГГц	> 1 ГГц
- объем оперативной памяти	> 512 Мб	> 512 Мб	> 512 Мб	> 4 Гб	> 4 Гб
- объем дискового пространства	> 100 Мб	> 100 Мб	> 100 Мб	> 20 Гб	> 20 Гб
Тип лицензии	бесплатная	бесплатная	проприетарная	проприетарная	проприетарная

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ШТАТНЫХ И АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСОВ АЭС ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ

Три из пяти рассмотренных программ доступны только по проприетарной лицензии и в большей степени используются в локальных ведомствах. Программы RESRAD и CROM доступны бесплатно, но дружелюбность интерфейса выше у CROM, поскольку программа пошагово открывает нужные окна в каждом модуле оценки, что значительно упрощает работу.

Таблица 2 содержит информацию о четырех программных средствах для прогнозирования радиационного воздействия на население в случае аварии на АЭС. Все они имеют одинаковое назначение, сходные функциональные возможности и похожие технические характеристики. В то же время, программы различаются по ряду показателей, к которым можно отнести особенности интегрированных в их состав моделей, поддерживаемые платформы, типы лицензии. Следует отметить существенные различия в точности моделей распространения примесей в атмосфере на разном масштабе: каждое программное средство включает модель для оценки ситуаций на локальном и мезомасштабном уровнях.

ESTE отличается от других программ обратным моделированием для оценки активности реального выброса. НОСТРАДАМУС и RECASS не оценивают миграцию радионуклидов по пищевой цепочке.

В отличие от остальных программных средств JRODOS может быть установлен не только на Windows, но и на Linux и Mac OS. JRODOS – двух-

компонентная система и состоит из двух приложений – Сервер и Клиент. В отличие от остальных программных продуктов это позволяет запускать его сразу на нескольких компьютерах, установив Сервер на один из них и подключив его к локальной сети. Таким образом, пользователи могут запускать Клиент на своих персональных компьютерах и выполнять вычисления, что снижает ресурсоемкость процесса и оптимизирует работу сотрудников.

Анализ программных средств позволил сформировать перечень критериев, по которым были определены оптимальные инструменты для оценки дозовых нагрузок на население: доступность программного средства (тип лицензии); возможности, определяемые составом расчетных модулей (моделей); дружелюбность интерфейса; ресурсоемкость; поддерживаемые платформы.

Оптимальным (с точки зрения моделирования процессов, параметрического обеспечения, доступности и «дружелюбности» интерфейса) программным средством для прогнозирования последствий хронических радиоактивных выбросов для населения является пакет CROM, разработанный на основе миграционных моделей МАГАТЭ. Этот пакет позволяет прогнозировать поведение радионуклидов в атмосфере и природных средах, оценивать плотности загрязнения, накопление радиоактивных веществ в компонентах экосистем и сельскохозяйственной продукции.

Таблица 2. Характеристики программных средств для оценки радиационного воздействия в случае аварии на АЭС

Программное средство	ESTE	НОСТРАДАМУС / POM	RECASS	JRODOS
Назначение	оценка дозы облучения населения в случае аварийных ситуаций	оценка дозы облучения населения в случае аварийных ситуаций	оценка дозы облучения населения в случае аварийных ситуаций	оценка дозы облучения населения в случае аварийных ситуаций
Исходные данные	- характеристика источника выбросов в атмосферу (размеры источника, состав и активность) - метеопараметры - базы данных параметров миграции радионуклидов и региональных данных для пищевой цепочки - информация о возрастных группах населения и сельском хозяйстве	- характеристика источника выбросов в атмосферу (размеры источника, состав и активность) - метеопараметры - базы данных параметров миграции радионуклидов и региональных данных - информация о разных возрастных группах населения	- характеристика источника выбросов в атмосферу (размеры источника, состав и активность) - метеопараметры - базы данных параметров миграции радионуклидов и региональных данных - информация о разных возрастных группах населения	- характеристика источника выбросов в атмосферу (размеры источника, состав и активность) - метеопараметры - базы данных параметров миграции радионуклидов и региональных данных для пищевой цепочки - информация о возрастных группах населения и сельском хозяйстве
Используемые модели распространения примесей в атмосфере	модель траектории облака (PTM) и модель Лагранжевых частиц (LPM)	лагранжево-стохастическая модель распространения радионуклидов в атмосфере	STAMP, RIMPUFF	ATSTEP, RIMPUFF, DIPCOT
Отличительные черты	- обратное моделирование для оценки активности реального выброса - программа формируется специально под предприятие ЯТЦ с учетом региональных параметров - при запросе разработчики добавляют в программу модель оценки доз от потребления продуктов питания - рекомендация защитных мер	- рекомендация защитных мер - результаты расчета представляются в виде отдельных окон с картами, на которых имеется анимированный слой динамики целевых показателей	- рекомендация защитных мер - программа может использоваться не только для оценки последствий аварийных выбросов радиоактивных веществ, но и химических загрязнителей, а также при выбросах вулканического пепла и продуктов горения лесных и торфяных пожаров.	- графическое представление пространственной информации - в программу можно загрузить слои карт с разными характеристиками (рельеф, землепользование, и т.д.) - рекомендация защитных мер - оценка доз от потребления продуктов питания
Поддерживаемые платформы	Windows	Windows	Windows	Windows, Linux, Mac OS
Технические характеристики				
– частота процессора	> 1 ГГц	> 1 ГГц	> 1 ГГц	> 2 ядер
– объем оперативной памяти	> 4 Гб	> 4 Гб	> 4 Гб	> 4 Гб +2 Гб на каждого пользователя
– объем дискового пространства	> 100 Гб	> 100 Гб	>100 Гб	> 1 Тб для сервера
Тип лицензии	проприетарная	проприетарная	проприетарная	бесплатная

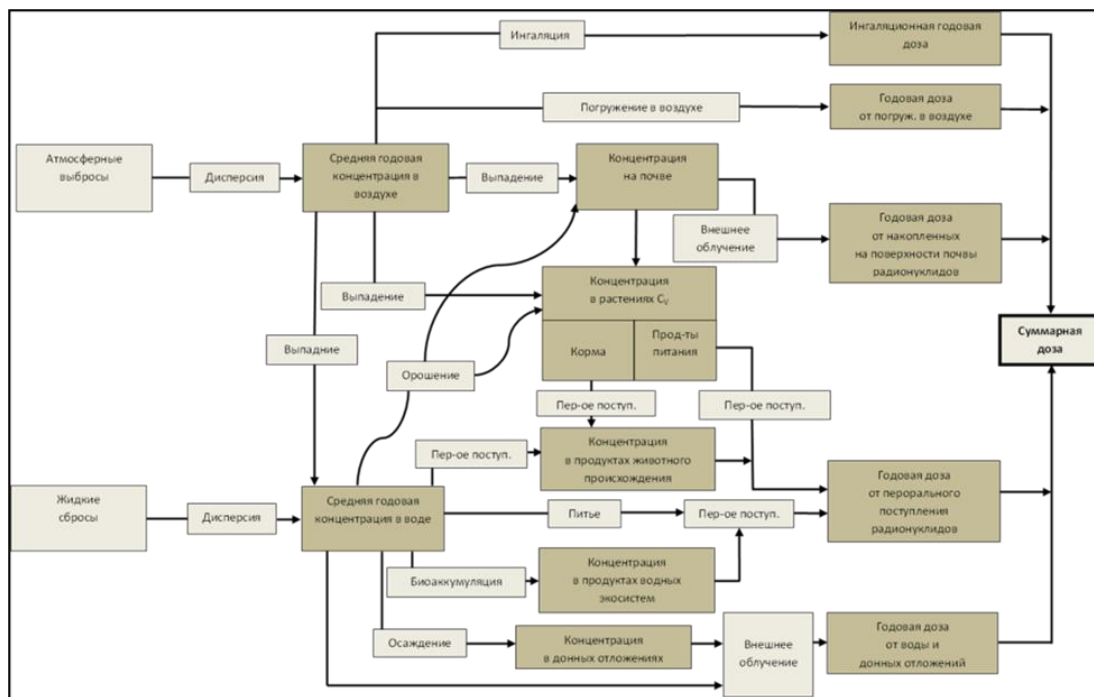


Рисунок 1. Процессы, определяющие формирование доз внутреннего и внешнего облучения человека в результате атмосферных выбросов и сбросов АЭС (программное средство CROM)

Программный пакет CROM был разработан Лабораторией информационных технологий (LABI) Школы промышленных инженеров Политехнического университета Мадрида в сотрудничестве с CIEMAT в рамках программы оценки воздействия радиационного фактора на окружающую среду.

CROM позволяет выполнить оценку дозовых нагрузок на разные возрастные группы населения в результате атмосферных выбросов и жидких сбросов в условиях нормальной эксплуатации АЭС. Модели, входящие в состав данного пакета, относятся к классу «screening models», то есть, моделей первичной консервативной оценки. Степень консерватизма оценённых доз определяется значениями параметров, использованных в расчётах.

Поскольку CROM применим при непрерывных выбросах в окружающую среду, можно принять допущение о том, что распределение радионуклидов в компонентах окружающей среды является квазиравновесным. В рамках возможных сценариев рассматриваются выбросы радионуклидов в атмосферу и радиоактивные сбросы в водные объекты (реки, эстуарии, морские береговые воды и озера или водохранилища). Во всех случаях рассчитывается дисперсия радионуклидов в среде в результате процессов диффузии и миграции. В результате проведения расчётов оцениваются концентрации радионуклидов в компонентах окружающей среды и дозовые нагрузки на критические группы населения с учётом различных путей поступления радиоактивных веществ в организм человека (рисунок 1).

Программный пакет CROM характеризуется оптимальным уровнем сложности (для решения поставленной задачи) и хорошо проработанным параметрическим обеспечением. Этот пакет создан с учётом информации, представленной в документе МАГАТЭ SRS №19 [10] с некоторыми улучшениями на основе EUR 15760 [11].

Для прогнозирования воздействия аварийных выбросов АЭС на население можно рекомендовать систему RODOS, разработанную Европейской комиссией. RODOS предоставляет информацию для принятия решений на локальном, региональном и национальном уровнях, а также для ранних и поздних стадий развития аварии. Этот программный комплекс позволяет выполнять сценарные расчёты по применению мероприятий, предназначенных для ликвидации последствий аварийных ситуаций [9].

В 2011 г. был проведен реинжиниринг системы на основе языка программирования JAVA, что позволило создать кроссплатформенную версию JRODOS, расширяющую возможности применения геоинформационных систем, современных технологий баз данных и интегрирования внешних модулей. Программный код, реализованный в среде Java, запускается во всех операционных системах.

Для проведения вычислений в программный комплекс JRODOS интегрированы математические модели рассеивания примесей в атмосфере (рисунок 2), миграции радионуклидов по пищевым цепочкам, дозиметрические модели, а также модели, позволяющие прогнозировать применение контрмер.

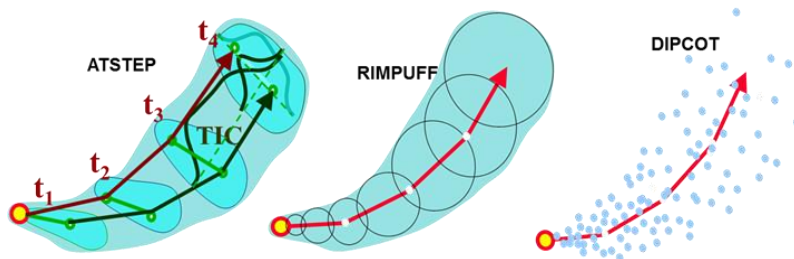


Рисунок 2. Моделирование рассеивания примесей в атмосфере (система RODOS)



Рисунок 3. Процессы, моделируемые в FDMT (система RODOS)

Дозовые нагрузки на население оцениваются по всем путям облучения (внутреннее облучение от ингаляции и перорального поступления радионуклидов, внешнее облучение от облака и осаждаемого радиоактивного материала). Так, составной частью системы JRODOS является модуль миграции радионуклидов по пищевым цепочкам – FDMT (Food Chain and Dose Module for Terrestrial Pathways) (рисунок 3).

В настоящее время система JRODOS используется в оперативных целях в Австрии, Финляндии, Германии, Нидерландах, Швейцарии и т.д. Более 20-ти учреждений в 16-ти странах используют систему на национальном и местном уровнях.

Проект RODOS в течение длительного времени находит свое применение в международной сети NERIS (Европейская платформа по подготовке к ядерным и радиационным чрезвычайным ситуациям и восстановлению). Эта сеть объединяет ученых, исследователей и специалистов, государственных администраторов и других заинтересованных лиц, которые содействуют согласованному подходу к обеспечению реагирования на чрезвычайные ситуации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе выполнен обзор и сравнение программных средств, предназначенных для прогнозирования радиационного воздействия на население при нормальной эксплуатации или в случае аварийной ситуации на АЭС. Рассмотрены основные характеристики, функциональные особенности, пре-

имущества и недостатки этих программных пакетов. Выделены критерии, по которым можно оценивать качество и эффективность программных средств: доступность программного средства (тип лицензии); возможности, определяемые составом расчетных модулей (моделей); дружелюбность интерфейса; ресурсоемкость; поддерживаемые платформы.

Обоснован оптимальный расчетный инструмент для прогнозирования дозовых нагрузок на население при штатной работе АЭС (программный пакет CROM) и при аварийных ситуациях (система RODOS).

Сделан вывод о том, что при разработке программ радиэкологического мониторинга необходимо оценивать вклады радионуклидов в дозовую нагрузку по данным, характеризующим как штатные выбросы АЭС, так и выбросы для всех сценариев проектных и запроектных аварий. Необходимыми компонентами такой оценки являются (кроме данных по радиоактивным выбросам), расчетные модели и значения параметров, характеризующих регионы расположения АЭС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках бюджетной программы 217 «Развитие науки» BR21882185 «Исследования в поддержку создания и безопасного функционирования атомной электростанции в Республике Казахстан».

ЛИТЕРАТУРА

1. User's manual for RESRAD-OFFSITE code version 4. – Vol. 1 – Methodology and Models Used in RESRAD-OFFSITE Code [Электронный ресурс]. – URL: https://resrad.evs.anl.gov/docs/RESRAD-OFFSITE_UsersManual.pdf.
2. Robles, B. Modelos implementados en el código CROM (Código de cRiba para evaluación de iMpacto) / B. Robles, A. Suárez, JC Mora, D. Cancio. – Madrid: CIEMAT, 2007. – 60 p. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/274641470>.
3. The Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment Used in PC-CREAM 08 [Электронный ресурс]. – URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/434637/HPA-RPD-058_June_2015.pdf.
4. Ludovít Lipták. Este annual impacts-system for assessment of radiological impacts of operational discharges from nuclear facilities / Ludovít Lipták, Eva Fojčíková, Monika Krpelanová, Miroslav Chylý, Peter Čarný // Radiation Protection Dosimetry. – 2019. – Vol. 186, Is. 2-3. – P. 315–320. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz225>
5. Программное средство для расчета радиационной обстановки в мезомасштабе (за пределами промышленной площадки объекта использования ядерной энергии. Учебная версия 1.0. POM/E1.0 : Учебное пособие. – М. : Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2018. – 132 с.
6. Fojčíková, E. Este–decision support system for nuclear and radiological accidents / E. Fojčíková, E. Lipták, M. Krpelanová, M. Chylý, P. Čarný // Radiation Protection Dosimetry. – 2019. – Vol. 186, Is. 2–3. – P. 321–325. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz226>
7. Арутюнян, Р.В. Компьютерная система НОСТРАДАМУС для поддержки принятия решений при аварийных выбросах на радиационно-опасных объектах / Р.В. Арутюнян, В.В. Беликов, Г.В. Беликова, О.С. Сороковикова и др. // Известия академии наук. – 1995. – Т. 33, № 4. – 44 с.
8. Косых В.С., Бородин Р.В., Корнейчук Н.А. RECASS NT: система информационной поддержки принятия решений в случае аварийных ситуаций на радиационно и химически опасных объектах. Сб. статей под ред. М.П. Коломеева «Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды» – Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2010. – Т. 3. – С. 24–35.
9. Ievdin, I. RODOS re-engineering: aims and implementation details. / I. Ievdin, D. Trybushnyi, M. Zheleznyak, W. Raskob // Radioprotection. – 2010. – Vol. 45, No. 5. – P. 181–189. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2010024>
10. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety Reports Series No. 19. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001. – 229 p.
11. European Commission, Directorate-General for Environment, Directorate-General for the Information Society and Media, Lawson, G., Simmonds, J., Mayall, A., Methodology for assessing the radiological consequences of routine releases of radionuclides to the environment, Publications Office, 1995 [Электронный ресурс]. – URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1078584c-9e21-40d1-9104-82939f315f25>.

REFERENCES

1. User's manual for RESRAD-OFFSITE code version 4.– Vol. 1 – Methodology and Models Used in RESRAD-OFFSITE Code [Electronic resource]. – URL: https://resrad.evs.anl.gov/docs/RESRAD-OFFSITE_UsersManual.pdf.
2. Robles, B. Modelos implementados en el código CROM (Código de cRiba para evaluación de iMpacto) / B. Robles, A. Suárez, JC Mora, D. Cancio. – Madrid: CIEMAT, 2007. – 60 p. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/274641470>.
3. The Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment Used in PC-CREAM 08 [Electronic resource]. – URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/434637/HPA-RPD-058_June_2015.pdf.
4. Ludovít Lipták. Este annual impacts-system for assessment of radiological impacts of operational discharges from nuclear facilities / Ludovít Lipták, Eva Fojčíková, Monika Krpelanová, Miroslav Chylý, Peter Čarný // Radiation Protection Dosimetry. – 2019. – Vol. 186, Is. 2-3. – P. 315–320. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz225>
5. Programmnoe sredstvo dlya rascheta radiatsionnoy obstanovki v mezomasshtabe (za predelami promyshlennoy ploshchadki ob"ekta ispol'zovaniya yadernoy energii. Uchebnaya ver-siya 1.0. ROM/E1.0 : Uchebnoe posobie. – Moscow: In-t problem bezopasnogo razvitiya atomnoy energetiki RAN, 2018. – 132 p.
6. Fojčíková, E. Este–decision support system for nuclear and radiological accidents / E. Fojčíková, E. Lipták, M. Krpelanová, M. Chylý, P. Čarný // Radiation Protection Dosimetry. – 2019. – Vol. 186, Is. 2–3. – P. 321–325. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz226>
7. Arutyunyan, R.V. Komp'yuternaya sistema NOSTRADA-MUS dlya podderzhki prinyatiya resheniy pri avariynykh vybrosakh na radiatsionno-opasnykh ob"ektakh / R.V. Arutyunyan, V.V. Belikov, G.V. Belikova, O.S. Sorokovikova i dr. // Izvestiya akademii nauk. – 1995. – Vol. 33, No. 4. – 44 p.
8. Kosykh V.S., Borodin R.V., Korneychuk N.A. RECASS NT: sistema informatsionnoy podderzhki prinyatiya resheniy v sluchae avariynykh situatsiy na radiatsionno i khimicheskii opasnykh ob"ektakh. Sb. statey pod red. M.P. Kolomeeva “Problemy gidrometeorologii i monitoringa okruzhayushchey sredy” – Obninsk: GU “VNIIGMI-MTsD”, 2010. – Vol. 3. – P. 24–35.
9. Ievdin, I. RODOS re-engineering: aims and implementation details. / I. Ievdin, D. Trybushnyi, M. Zheleznyak, W. Raskob // Radioprotection. – 2010. – Vol. 45, No. 5. – P. 181–189. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2010024>
10. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety Reports Series No. 19. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001. – 229 p.
11. European Commission, Directorate-General for Environment, Directorate-General for the Information Society and Media, Lawson, G., Simmonds, J., Mayall, A., Methodology for assessing the radiological consequences of routine releases of radionuclides to the environment, Publications Office, 1995 [Electronic resource]. – URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1078584c-9e21-40d1-9104-82939f315f25>.

ХАЛЫҚ ҮШІН АТОМ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫНЫҢ ШТАТТЫҚ ЖӘНЕ АВАРИЯЛЫҚ ШЫҒАРЫНДЫЛАРЫНЫҢ РАДИОЭКОЛОГИЯЛЫҚ САЛДАРЫН БОЛЖАУҒА АРНАЛҒАН БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ҚҰРАЛДАРДЫ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

М. К. Мүкушева¹, С. И. Спиридонов², Р. А. Микаилова², А. В. Топорова^{3*}

¹ «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК, Курчатов, Қазақстан

² «Курчатов институты» ФЗО ВНИИРАЭ, Мәскеу, Ресей

³ ҚР ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

*Байланыс үшін E-mail: toporova@nnc.kz

Мақалада қалыпты пайдалану кезінде және АЭС-та авариялық жағдай барысында халыққа радиациялық әсерді болжауға арналған бағдарламалық құралдарға шолу және салыстыру келтірілген. RESRAD, CROM, PC-CREAM 08®, ESTE Annual Impacts, ROM, ESTE, NOSTRADAMUS, RECASS, RODOS бағдарламалық пакеттерінің негізгі сипаттамалары, функционалдық ерекшеліктері, артықшылықтары мен кемшіліктері қарастырылады. Бағдарламалық құралдардың сапасы мен тиімділігін бағалау критерийлері бөлінді. АЭС (CROM пакеті) және төтенше жағдайлар (RODOS жүйесі) үшін қолданылатын оңтайлы есептеу құралдары негізделген.

Түйін сөздер: бағдарламалық қамтамасыз ету, АЭС, қалыпты пайдалану, авариялық жағдай, жылдық тиімді доза, мониторинг.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARE TOOLS TO PREDICT THE RADIOECOLOGICAL CONSEQUENCES AFTER ROUTINE AND ACCIDENTAL EMISSIONS BY NPP FOR THE POPULATION

M. K. Mukusheva¹, S. I. Spiridonov², R. A. Mikailova², A. V. Toporova^{3*}

¹ RSE “National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan”, Kurchatov, Kazakhstan

² NRC “Kurchatov Institute” VNIIRAE, Moscow, Russia

³ Branch “Institute of Radiation Safety and Ecology” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

*E-mail for contacts: toporova@nnc.kz

This article provides an overview and comparison of software tools to predict the public radiation effect under normal and off-normal NPP operating conditions. The main characteristics, functional features, advantages and disadvantages of the software packages RESRAD, CROM, PC-CREAM 08®, ESTE Annual Impacts, POM, ESTE, NOSTRADAMUS, RECASS, RODOS were addressed. Criteria for assessing the quality and efficiency of software tools were highlighted. The optimal computational toolware applicable to the NPP normal (CROM package) and off-normal (RODOS system) operating conditions was substantiated.

Keywords: software, NPP, normal operation, off-normal situation, annual effective dose, monitoring.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-96-103>

УДК 004.4'2 (574.41)

ОБЗОР ГИС-ПЛАТФОРМ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ИХ ПРИМЕНИМОСТИ В КОНТЕКСТЕ УСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗЕМЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ И ВОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ БЫВШЕГО СИП

И. А. Бачурина*, В. Н. Монаенко, Н. В. Ларионова, А. В. Топорова

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

*E-mail для контактов: bachurina@nnc.kz

В статье рассмотрены основные инструменты для создания геопространственных Веб-приложений с акцентом на трех ключевых программных продуктах: ArcGIS Online, ArcGIS Experience Builder, ArcGIS Enterprise SDK. Проведен анализ и сравнение их функциональных возможностей. В контексте разработки Веб-приложения по устойчивому управлению земельными ресурсами и водными объектами территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона, расположенными на участках, планируемых к передаче в народно-хозяйственный оборот, освещены преимущества и недостатки каждой из платформ. Полученные результаты дают комплексное представление о выборе наилучшего инструмента для эффективной разработки геопространственных Веб-приложений с учетом конкретных задач и специфики территории полигона.

Ключевые слова: СИП, Веб-приложение, геопространственные данные, карты, ArcGIS, геоинформационные системы, API.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современной экологической обстановки оценка и управление земельными ресурсами становятся приоритетными задачами для обеспечения экологической безопасности. Территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП) представляют собой особый объект исследования, где выявлены сверхнормативно-загрязненные участки, требующие ограничений, и пригодные к передаче в хозяйственный оборот – условно чистые территории [1]. Осуществление эффективного управления этими земельными ресурсами требует инновационных решений. В этой связи наиболее удобным инструментом выступают Веб-приложения, которые могут предоставить комплексное решение для оценки, мониторинга и управления данными. Электронный ресурс, базирующийся на геопространственных технологиях, представляет собой современный и инновационный способ обеспечения доступа к обширной информации о земельных ресурсах СИП. Этот подход не только способствует повышению экологической безопасности, но и обеспечивает общественную информированность, содействуя устойчивому управлению территорией бывшего СИП в перспективе.

В настоящее время накоплен огромный объем информации о территории бывшего СИП, включая результаты научно-исследовательских программ и коммерческих проектов. На данный момент, Институт радиационной безопасности и экологии располагает обширным массивом геопространственных данных: свыше 1000 слоев класса пространственных данных, которые, в свою очередь, содержат информацию о более 100 тыс. объектов. Уже внедрена база данных «Радиоэкологическое состояние Семипалатинского испытательного ядерного полигона», в которой хранятся результаты радиометрических и спектрометрических измерений –

около 200 тыс. проб объектов окружающей среды и географических координат мест отбора проб [2]. Весь имеющийся картографический материал и базы данных касательно радиоэкологического состояния территории бывшего полигона, накопленный за годы обследования, сформирован с использованием программного комплекса ArcGis, следовательно, для упрощения переноса данных в картографическое Веб-приложение необходимо рассмотреть программный комплекс ArcGIS в сфере разработки кроссплатформенных Веб-приложений.

ArcGIS, разработанный ESRI (Environmental Systems Research Institute), представляет собой всестороннюю геоинформационную систему (ГИС), обладающую выдающимися возможностями анализа, визуализации и управления геопространственными данными. Эта платформа объединяет разнообразные продукты, включая ArcGIS Online для облачных решений, ArcGIS Desktop для приложений на рабочем столе, и ArcGIS Server для развертывания на собственных серверах. Она также предоставляет API и инструменты разработки для создания индивидуальных приложений. ArcGIS примечателен своей способностью к выполнению сложных пространственных анализов, включая геостатистические расчеты, моделирование поверхности и анализ сетей. Платформа обеспечивает создание интерактивных карт, которые могут быть легко интегрированы в Веб-приложения, делая ее ценным инструментом для визуализации и обмена геопространственной информацией. Одним из сильных аспектов ArcGIS является его доступ к обширным наборам геопространственных данных, включая карты, снимки спутников и информацию о территориальных особенностях. Это обеспечивает пользователей ценными ресурсами для различных исследовательских и прикладных задач.

Цель данной работы – обзор и анализ программных продуктов ArcGIS для выявления наиболее оптимального решения для разработки Веб-приложения в контексте устойчивого управления земельными ресурсами и водными объектами территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона, расположенными на участках, планируемых к передаче в народно-хозяйственный оборот.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Среди всех программных продуктов, предоставляемых компанией ESRI, были выбраны следующие, наиболее подходящие для выполнения поставленных задач: ArcGIS Online, ArcGIS Experience Builder, ArcGIS Enterprise SDK. Рассмотрим каждый в отдельности.

ArcGIS Online – это мощная геопространственная платформа, которая обеспечивает возможности создания, хранения и обмена геопространственными данными и приложениями. Платформа является облачной [3], что обеспечивает высокую доступность и удобство использования без необходимости развертывания и поддержки собственной инфраструктуры.

Одной из ключевых характеристик ArcGIS Online является возможность создания интерактивных веб-карт и приложений без необходимости глубоких знаний программирования. Пользователи могут легко добавлять и стилизовать геоданные, использовать готовые картографические слои и символику, делая процесс визуализации данных интуитивно понятным [4]. Платформа также предоставляет возможности для совместной работы и обмена данными. Пользователи могут создавать группы для коллективной разработки проектов, обмениваться данными и приложениями [5], что делает ArcGIS Online подходящим инструментом для командной работы в области геоинформационных технологий. Открытость к сторонним интеграциям и расширениям является ещё одним важным аспектом. Платформа предоставляет API для разработчиков, что позволяет создавать индивидуальные приложения и интегрировать их с другими системами. ArcGIS Online предоставляет возможности для создания инфографики, что облегчает визуализацию данных в более доступной форме. Также пользователи могут воспользоваться инструментами пространственного анализа для получения ценных инсайтов из геоданных. Наконец, платформа обеспечивает масштабируемость и гибкость. Пользователи получают доступ к вычислительным ресурсам и хранилищу облачной инфраструктуры, что обеспечивает высокую производительность и возможность масштабирования в зависимости от потребностей проекта.

Таким образом, ArcGIS Online представляет собой всестороннюю геопространственную платформу, охватывающую широкий спектр возможностей от создания карт и визуализации данных до совместной работы и пространственного анализа [6].

ArcGIS Experience Builder – это передовой инструмент для создания Веб-приложений и интерактивных карточек с учетом геопространственного контекста [7]. Experience Builder предоставляет пользовательскую среду с визуальным интерфейсом, спроектированную для поддержки как новичков, так и опытных разработчиков. Основываясь на концепции “What You See Is What You Get” (WYSIWYG), пользователи могут легко настраивать приложения с минимальными знаниями программирования.

Важным аспектом Experience Builder является его адаптивность к потребностям различных пользователей. Это означает, что приложения могут быть созданы без участия разработчиков, используя готовые виджеты и макеты [8], но также предоставляет гибкие возможности для тех, кто желает глубже настроить приложение через пользовательский код. Визуализация данных является ключевой чертой Experience Builder. Пользователи могут интегрировать геоданные и картографические элементы в свои приложения, обеспечивая интерактивное взаимодействие с пользователями. Также инструмент предоставляет широкий спектр готовых виджетов для визуализации данных в удобной форме. Experience Builder может интегрироваться с другими сервисами и приложениями через API. Это обеспечивает хороший функционал и возможность работы с внешними данными. Есть возможность интегрировать как 2D, так и 3D данные в одно Веб-приложение. 2D и 3D карты могут быть синхронизированы, предоставляя пользователям возможность взаимодействовать с содержимым в одном месте [9]. Особенностью инструмента является поддержка множеств устройств и экранов, что обеспечивает получение информации на любом устройстве с мобильно-оптимизированными Веб-приложениями.

ArcGIS Experience Builder – это интуитивно понятное средство для создания Веб-приложений, обеспечивающее баланс между гибкостью в настройке и удобством использования для широкого круга пользователей.

ArcGIS Enterprise SDK – это набор инструментов разработки программного обеспечения для создания пользовательских расширений и интеграции с ArcGIS Enterprise [10], которая представляет собой платформу геопространственного анализа и управления данными. SDK предоставляет разработчикам широкие возможности для создания индивидуальных приложений и расширений, которые могут быть интегрированы в инфраструктуру ArcGIS Enterprise.

Одной из ключевых особенностей ArcGIS Enterprise SDK является его способность работать в среде геопространственных данных. Разработчики могут использовать этот SDK для создания собственных расширений для ArcGIS Server [11], порталов, а также для взаимодействия с геоданными в различных форматах.

Таблица 1. Сравнение функциональных характеристик и возможностей в продуктах ESRI

Параметры	ArcGIS Online	ArcGIS Experience Builder	ArcGIS Enterprise SDK
Тип платформы	облачная	локальная	локальная
Уровень доступности	высокий	высокий	локальный, требует развертывания
Удобство использования	прост в использовании, не требует глубоких знаний	интуитивно понятный визуальный интерфейс, минимальное программирование	требует опыта программирования, более сложен в использовании
Возможности настройки	ограничены	средние	высокие
Гибкость в визуализации	ограничена	средняя	высокая
Интеграция с базой данных	возможна, но ограничена	возможна	полная интеграция
Поддержка языков	—	—	JavaScript, Python, Java, .NET и др.
Тип приложения	Веб-приложения, веб-карты	Веб-приложения, карточки	пользовательские расширения и интеграция с ArcGIS Enterprise
Возможности визуализации	ограничены	средние	средние
Поддержка анализа данных	ограничена	ограничена	возможности для работы с геоданными, анализа и визуализации данных в созданных приложениях
Совместимость с другими продуктами ESRI	возможна, ограничена	возможна	полная интеграция
Поддержка разработчика	документация и поддержка сообщества	документация и поддержка сообщества	доступ к документации и сообществу, API для разработчиков

SDK предоставляет набор API и библиотек для языков программирования, таких как JavaScript, Python, Java и .NET, что делает его гибким и приспособленным к различным стекам технологий разработки. Это также позволяет разработчикам использовать свои предпочтительные инструменты и языки программирования при создании пользовательских решений.

Среди ключевых возможностей ArcGIS Enterprise SDK можно выделить:

- *Разработка пользовательских виджетов и приложений:* разработчики могут создавать собственные компоненты пользовательского интерфейса и приложения, интегрированные в ArcGIS Enterprise.

- *Работа с геоданными:* SDK предоставляет функциональность для работы с геоданными, их анализа и представления в созданных приложениях.

- *Интеграция с ArcGIS Enterprise:* разработчики могут интегрировать свои решения непосредственно с инфраструктурой ArcGIS Enterprise, взаимодействовать с сервисами, данными и функциональностью.

- *Многоплатформенность:* SDK поддерживает различные языки программирования, что позволяет создавать решения для разных платформ и устройств.

- *Документация и поддержка:* разработчики имеют доступ к обширной документации и сообществу, что облегчает процесс разработки и решение возможных трудностей.

- *Адаптация к различным сценариям использования:* SDK может быть использован для разработки решений как в Веб-приложениях, так и в настольных приложениях, что позволяет адаптировать его под различные сценарии использования в организации [5].

Использование ArcGIS Enterprise SDK предоставляет организациям возможность создавать высококачественные геопространственные приложения, интегрированные с их инфраструктурой ArcGIS Enterprise, что способствует более эффективному управлению и анализу геоданных.

Сравнение параметров и функциональных возможностей, рассмотренных выше средств разработки, представлено в таблице 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Веб-приложение должно представлять собой функциональность по сбору, анализу и визуализации данных, связанных с загрязнением радионуклидами и тяжелыми металлами, динамикой изменения концентраций во времени и пространстве, оценке качества воды, зонированию территории и другим аспектам радиэкологического состояния.

Пространственной основой Веб-приложения станут картографические материалы, выполняющие функцию визуализации и анализа географических данных. Такая основа позволит пользователям взаимодействовать с данными в контексте их местоположения. Картографический цифровой материал можно считать интегрирующей подложкой проекта, на которую накладываются статистические и спутниковые данные (снимки), тематические карты, табличная и фактографическая информация. Картографический материал будет представлен всей территорией полигона, но наибольший интерес будут составлять территории СИП, не входящие в Семипалатинскую зону ядерной безопасности (далее СЗЯБ), так как они предназначены для передачи в народно-хозяйственный оборот, согласно закону «О Семипалатинской зоне ядерной безопасности».

Атрибутивной основой для создания Веб-приложения по устойчивому управлению земельными ресурсами и водными объектами территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона (СИП) станут полученные в ходе комплексного радиоэкологического обследования результаты исследований о состоянии почвенного покрова, атмосферного воздуха, водной среды, растительного и животного мира, объединенные в специализированную базу данных (рисунки 1, 2). Достоверность этих данных обеспечивается действующей системой менеджмента качества и системой экологического менеджмента (ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, ISO 19011-2011), а также имеющимся аттестатом №КЗ.Т.07.2142. в системе аккредитации РК на соответствие требованиям ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий»[12].

Для разработки Веб-приложения немаловажную роль играет картографический сервис. Этот сервис предоставляет доступ к картам через локальную сеть или интернет с помощью клиентских Веб-приложений. Данные сервисы содержат в себе все необходимые слои разнотипных геопространственных и атрибутивных данных. В свою очередь, выделяют два основных вида картографических сервисов – динамические и кэшированные.

Прорисовка динамических карт осуществляется в тот момент, когда на них поступает запрос от пользо-

вателя. У них низкое быстродействие, но они подходят для высокопроизводительных интранет-приложений и приложений, для которых необходимо отображение данных «в реальном времени» [13].

Кэшированные картографические сервисы являются самым быстрым способом доступа к картам в сети интернет через Веб-приложение. Этим способом публикации карт пользуются такие сервисы, как: ArcGIS Online, Карты Google (Google Maps), Карты Bing (Bing Maps) и многие другие сервисы. Но, при использовании кэшированного картографического сервиса отсутствует возможность оперативного изменения или дополнения геопространственных данных, так как данные сервисы не кэшируются автоматически и при повторной публикации карт необходимо повторно создать кэш геопространственных данных [14].

Основным преимуществом кэшированных картографических сервисов является то, что при создании кэша карты сервер обрисовывает всю карту на нескольких уровнях масштабирования и сохраняет сжатые копии этих изображений в кэш. Всякий раз, когда сервер получает запрос на карту, он гораздо быстрее возвращает кэшированное изображение, чем заново отрисует карту при динамической отрисовке карт. Другое преимущество кэширования состоит в том, что высокая детализация изображения не сказывается на времени предоставления кэшированного изображения карты [13].

Знак K-40 (<)	K-40	Погрешность измерений	Знак Th-232 (<)	Th-232	Знак Ra-226 (<)	Погрешность измер...	Ra-226	Погрешность измерений	Знак U-238 (<)
	720	140		33					
	980	200		26		4	36	8	
	630	130		32		3.3	65	8	
	740	150		16			19	8	
	730	150		16			45	8	
	750	150		26		2.5	37	8	
	690	140		20		3.2	25	7	
	660	130		23		3.4	39	8	
	970	190		27			25	9 <	
	750	150		37			24	11	
	710	140 <		13			32		
	840	170 <		13			35		
	580	120		14		2.5	40	8	
	720	140 <		14		3.9	46		
	620	120 <		21			36		
	430	90		17			28	8	
	560	110 <		20		7	37		
	710	140		12		3	48	6	
	750	150		19		2.4	43	8	
	570	110 <		19			39		
	750	150		16		3.3	37	8	
	330	70 <		11			44		
	440	90		15		2.9	47	7	
	310	80 <		13			37		

Рисунок 1. Интерфейс базы данных «Радиоэкологическое состояние Семипалатинского испытательного ядерного полигона» (загрузка проб по индексам)

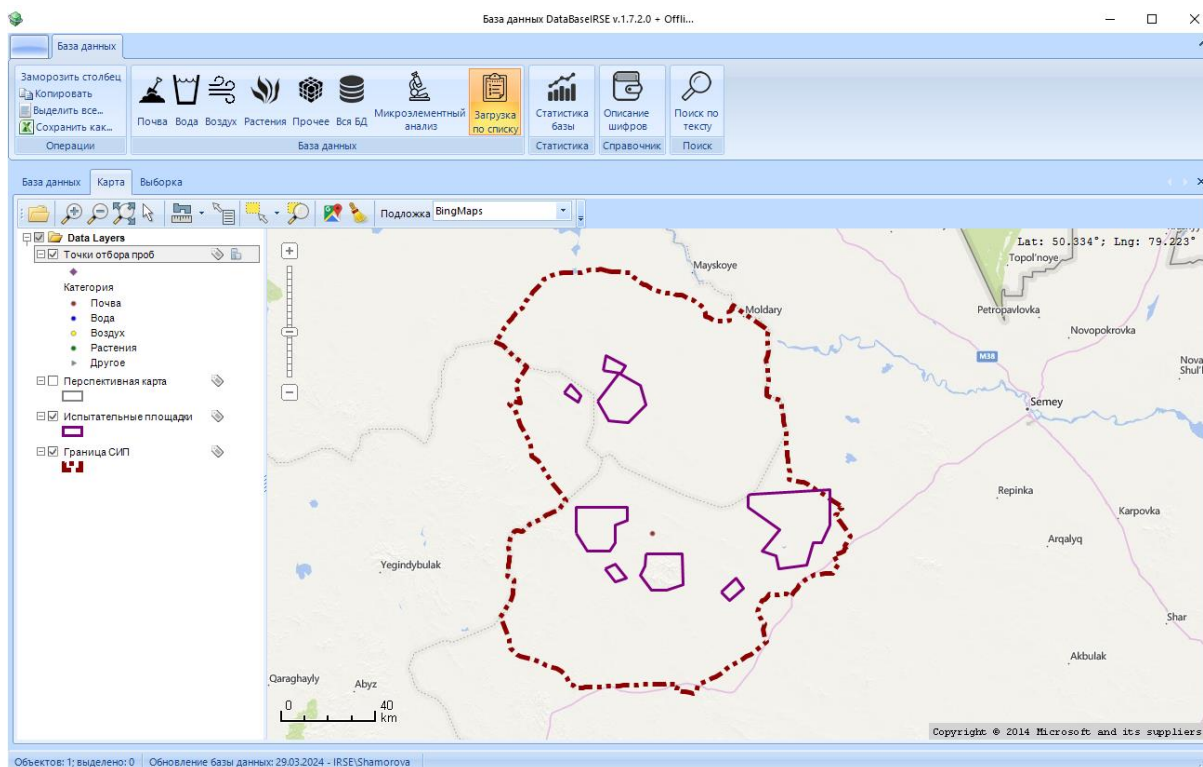


Рисунок 2. Интерфейс базы данных «Радиоэкологическое состояние Семипалатинского испытательного ядерного полигона» (пространственная визуализация)

Поэтому, в контексте разработки Веб-приложения для устойчивого управления земельными ресурсами и водными объектами территории бывшего СИП, выбор ArcGIS Enterprise SDK является вполне обоснованным. Данное решение основано на следующих ключевых факторах:

– *Геопространственная основа:* ArcGIS Enterprise SDK предоставляет оптимальные средства для работы с геоданными. Веб-приложение, базирующееся на картографической основе, будет эффективно взаимодействовать с пространственной информацией, обеспечивая наглядность текущей радиоэкологической обстановки на территории СИП.

– *Интерактивная карта и анализ данных:* ArcGIS Enterprise SDK позволяет интегрировать в Веб-приложение интерактивные карты, а также проводить анализ геоданных. Это важно для визуальной интерпретации результатов радиоэкологических исследований.

– *Интеграция с базой данных:* ArcGIS Enterprise SDK обеспечивает возможность интеграции приложения с уже имеющейся базой данных, в которой хранятся результаты радиоэкологических исследований. Такая интеграция обеспечит достоверность и доступность данных.

– *Многоплатформенность:* SDK поддерживает различные языки программирования, что позволяет создавать решения для разных платформ и устройств, обеспечивая удобство использования Веб-приложения на различных устройствах.

– *Адаптация к сценариям использования:* архитектура ArcGIS Enterprise SDK позволяет адаптироваться под различные сценарии использования в контексте устойчивого управления земельными ресурсами и водными объектами на территории СИП.

– *Документация и поддержка:* SDK обеспечивает доступ к обширной документации и сообществу разработчиков, что облегчит процесс разработки и обеспечит поддержку.

Рассмотренные ранее инструменты разработки, такие как ArcGIS Online и ArcGIS Experience Builder, имеют определенные ограничения, что делает их менее предпочтительными по сравнению с ArcGIS Enterprise SDK по ряду причин.

ArcGIS Online ограничен в возможностях настройки, что снижает его гибкость и делает его менее подходящим для успешной реализации нашего проекта. Ограничения в безопасности и контроле также выявлены, что делает эту платформу менее предпочтительной для наших специфических требований.

ArcGIS Experience Builder также имеет свои ограничения. Он обладает ограниченной гибкостью в визуализации данных, что может быть несовместимо с высокими стандартами визуального представления информации. Ограничения в пользовательском интерфейсе могут также быть препятствием для проектов, требующих выдающейся степени индивидуализации.

С другой стороны, ArcGIS Enterprise SDK обладает рядом преимуществ. Он предоставляет высокий

уровень локального контроля и безопасности, что соответствует нашим стремлениям соблюсти высокие стандарты в этих областях. Кроме того, гибкая настройка делает его предпочтительным вариантом для проектов, требующих глубокой индивидуализации и гибкости.

Таким образом, учитывая чувствительность данных, ограниченные возможности визуализации и поддержки анализа данных, а также отсутствие многоплатформенности и поддержки языков, ArcGIS Online и ArcGIS Experience Builder могут не полностью удовлетворить наши потребности, в то время как ArcGIS Enterprise SDK обладает всеми необходимыми характеристиками. Касательно картографических сервисов, кэшированными сервисами актуально представлять базовые карты. Это карты, которые не требуют оперативного изменения данных (например, топографические карты, карты границ земельных участков, гидрографии и т.п.). Динамическая отрисовка карт, актуальна для результатов лабораторных исследований отобранных проб и отражения мониторинговых объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для разработки Веб-приложения по устойчивому управлению земельными ресурсами и водными объектами бывшего СИП, расположенными на участках, планируемых к передаче в народно-хозяйственный оборот, был проведен обзор и подробный анализ программных продуктов, предоставляемый компанией ESRI. Из рассмотренных вариантов – ArcGIS Online, ArcGIS Experience Builder и ArcGIS Enterprise SDK – выбор пал на последний как на оптимальное решение. Этот выбор обоснован наличием локального контроля и повышенной безопасности, что имеет первостепенное значение для обработки чувствительных экологических данных.

По сравнению с ArcGIS Online и ArcGIS Experience Builder, где выявлены ограничения в гибкости визуализации и пользовательского интерфейса, SDK отличается возможностью высокоуровневой настройки этих аспектов. Это крайне важно при создании Веб-приложения для радиоэкологических данных, где точность представления и комфорт пользовательского взаимодействия играют ключевую роль.

Кроме того, ArcGIS Enterprise SDK обеспечивает необходимую интеграцию с базой данных, где хранятся результаты радиоэкологических исследований, обеспечивая тем самым достоверность и доступность данных. Поддержка различных языков программирования делают SDK наилучшим выбором для адаптации под разнообразные сценарии использования в устойчивом управлении территориями.

Наконец, широкая документация и поддержка сообщества разработчиков обеспечивают надежность в процессе разработки и последующей эксплуатации приложения. Таким образом, выбор ArcGIS Enterprise SDK является обоснованным шагом для успеш-

ной реализации проекта управления земельными ресурсами и водными объектами бывшего СИП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках научной программы BR21882086 «Разработка устойчивого управления земельными ресурсами и водными объектами на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона».

ЛИТЕРАТУРА

1. Айдарханов, А.О. Комплексное радиоэкологическое обследование Семипалатинского испытательного полигона / А.О. Айдарханов, Е.В. Мустафина, Н.В. Ларионова, П.Е. Кривицкий, Ю.В. Бакланова // Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана / Ин-т радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК. – 2023. – Вып. 7. – С. 13–26.
2. Абишева, М.Т., Монаенко В.Н. Геоинформационные технологии в обследовании семипалатинского испытательного полигона / М.Т. Абишева, В.Н. Монаенко // Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала: материалы X междунар. конф. (12–14 сентября 2023 г., г. Курчатова). – Курчатова: РГП НЯЦ РК, 2023. – С. 104.
3. ArcGIS SaaS Infrastructure [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/capabilities/infrastructure> (дата обращения 03.02.2024).
4. Make Maps: Build interactive maps that explain your data [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/capabilities/make-maps> (дата обращения 03.02.2024).
5. Collaborate with colleagues: Work effectively across your organization building and using maps [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/capabilities/collaborate> (дата обращения 03.02.2024).
6. ArcGIS Online: A complete software as a service platform for your mapping and analysis workflows [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/overview> (дата обращения 03.02.2024).
7. ArcGIS Experience Builder overview and concepts [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/experience-builder/mapping/experience-builder-overview/> (дата обращения 03.02.2024).
8. ArcGIS Experience Builder: виджеты [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://doc.arcgis.com/ru/experience-builder/latest/configure-widgets/widgets-overview.htm> (дата обращения 03.02.2024).
9. ArcGIS Experience Builder: Что такое ArcGIS Experience Builder? [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://doc.arcgis.com/ru/experience-builder/latest/get-started/what-is-arcgis-experience-builder.htm> (дата обращения 05.02.2024).
10. ArcGIS Enterprise SDK /.NET Guide: What is ArcGIS Enterprise SDK [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://developers.arcgis.com/enterprise-sdk/guide/net/> (дата обращения 05.02.2024).

11. ArcGIS Enterprise SDK /.NET Guide: Frequently asked questions [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://developers.arcgis.com/enterprise-sdk/guide/net/frequently-asked-questions-net/> (дата обращения 05.02.2024).
12. Комплексное радиоэкологическое обследование Семипалатинского испытательного полигона: монография / Э.Г. Батырбеков, А.О. Айдарханов, А.А. Витюк, [и др.]; Ин-т радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК. – Кокшетау: ТОО «Надежда 2050», 2021. – 339 с.: ил – Библиогр.: с. 315–339; 212 назв. – 500 экз. – ISBN 978-601-7972-64-6.
13. Быков, А.В. Web-картографирование: учеб. пособие / А.В. Быков, С.В. Пьянков; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2015. – 110 с. – ISBN 978-5-7944-2565-9.
14. О кэшированных картографических сервисах [Электронный ресурс]. – 2024 – URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/map/web-maps-and-services/about-cached-map-services.htm> (дата обращения 19.02.2024).
6. ArcGIS Online: A complete software as a service platform for your mapping and analysis workflows [Electronic resource]. – 2024. – URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/overview> (date of access 03.02.2024).
7. ArcGIS Experience Builder overview and concepts [Elektronnyy resurs]. – 2024. – URL: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/experience-builder/mapping/experience-builder-overview/> (date of access 03.02.2024).
8. ArcGIS Experience Builder: vidzhety [Electronic resource]. – 2024. – URL: <https://doc.arcgis.com/ru/experience-builder/latest/configure-widgets/widgets-overview.htm> (date of access 03.02.2024).
9. ArcGIS Experience Builder: Chto takoe ArcGIS Experience Builder? [Electronic resource]. – 2024. – URL: <https://doc.arcgis.com/ru/experience-builder/latest/get-started/what-is-arcgis-experience-builder.htm> (date of access 05.02.2024).
10. ArcGIS Enterprise SDK /.NET Guide: What is ArcGIS Enterprise SDK [Electronic resource]. – 2024. – URL: <https://developers.arcgis.com/enterprise-sdk/guide/net/> (date of access 05.02.2024).
11. ArcGIS Enterprise SDK /.NET Guide: Frequently asked questions [Electronic resource]. – 2024. – URL: <https://developers.arcgis.com/enterprise-sdk/guide/net/frequently-asked-questions-net/> (date of access 05.02.2024).
12. Комплексное радиоэкологическое обследование Семипалатинского испытательного полигона: монография / Э.Г. Батырбеков, А.О. Айдарханов, А.А. Витюк, [и др.]; Ин-т радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК. – Кокшетау: ТОО «Надежда 2050», 2021. – 339 с.: ил – Библиогр.: с. 315–339; 212 назв. – 500 экз. – ISBN 978-601-7972-64-6.
13. Bykov, A.V. Web-kartografirovaniye: ucheb. posobie / A.V. Bykov, S.V. P'yankov; Perm. gos. nats. issled. un-t. – Perm', 2015. – 110 p. – ISBN 978-5-7944-2565-9.
14. O keshirovannykh kartograficheskikh servisakh [Electronic resource]. – 2024 – URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/map/web-maps-and-services/about-cached-map-services.htm> (date of access 19.02.2024).

REFERENCES

1. Aydarkhanov, A.O. Kompleksnoe radioekologicheskoe obsledovanie Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona / A.O. Aydarkhanov, E.V. Mustafina, N.V. Larionova, P.E. Krivitskiy, Yu.V. Baklanova // Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana / In-t radiatsionnoy bezopasnosti i ekologii RGP NYaTs RK. – 2023. – Issue 7. – P. 13–26.
2. Abisheva, M.T., Monaenko V.N. Geoinformatsionnye tekhnologii v obsledovanii semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona / M.T. Abisheva, V.N. Monaenko // Semipalatinskiy ispytatel'nyy poligon: nasledie i perspektivy razvitiya nauchno-tekhnicheskogo potentsiala: materialy X mezhdunar. konf. (12–14 sentyabrya 2023 g., g. Kurchatov). – Kurchatov: RGP NYaTs RK, 2023. – P. 104.
3. ArcGIS SaaS Infrastructure [Electronic resource]. – 2024. – URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/capabilities/infrastructure> (date of access 03.02.2024).
4. Make Maps: Build interactive maps that explain your data [Electronic resource]. – 2024. – URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/capabilities/make-maps> (date of access 03.02.2024).
5. Collaborate with colleagues: Work effectively across your organization building and using maps [Electronic

**ФУНКЦИОНАЛДЫЛЫҚ МҮМКІНДІКТЕРДІ ТАЛДАУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ БҰРЫНҒЫ ССП
ЖЕР ЖӘНЕ СУ ОБЪЕКТІЛЕРІН ТҰРАҚТЫ БАСҚАРУ КОНТЕКСТІНДЕ ҚОЛДАНЫЛУЫ
НЕГІЗІНДЕ ГЕОКЕҢІСТІК ВЕБ-ҚОСЫМШАЛАРДЫ ӘЗІРЛЕУГЕ АРНАЛҒАН
ГАЗ ПЛАТФОРМАЛАРЫНА ШОЛУ**

И. А. Бачурина*, В. Н. Монаенко, Н. В. Ларионова, А. В. Топорова

ҚР ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

**Байланыс үшін E-mail: bachurina@nnc.kz*

Мақалада үш негізгі бағдарламалық өнімге назар аударып, геокеңістіктік Веб-қосымшаларды: ArcGIS Online, ArcGIS Experience Builder, ArcGIS Enterprise SDK құрудың негізгі құралдары қарастырылған. Олардың функционалдық мүмкіндіктерін талдау және салыстыру жүргізілді. Халық-шаруашылық айналымына беру жоспарланған учаскелерде орналасқан бұрынғы Семей сынақ полигоны аумағының жер ресурстары мен су объектілерін тұрақты басқару жөніндегі Веб-қосымшаны әзірлеу контекстінде платформалардың әрқайсысының артықшылықтары мен кемшіліктері атап өтілді. Алынған нәтижелер полигон аумағының нақты міндеттері мен ерекшеліктерін ескере отырып, геокеңістіктік Веб-қосымшаларды тиімді әзірлеу үшін ең жақсы құралды таңдау туралы кешенді түсінік береді.

Түйін сөздер: ССП, Веб-қосымша, геокеңістік деректер, карталар, ArcGIS, геоақпараттық жүйелер, API.

**OVERVIEW OF GIS-PLATFORMS TO DEVELOP GEOSPATIAL WEB APPLICATIONS
BASED UPON THE ANALYSIS OF FUNCTIONALITIES AND APPLICABILITY IN THE CONTEXT
OF THE SUSTAINABLE MANAGEMENT OF LAND RESOURCES AND WATER BODIES
AT THE FORMER STS**

I. A. Bachurina*, V. N. Monayenko, N. V. Larionova, A. V. Toporova

Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

**E-mail for contacts: bachurina@nnc.kz*

The article addresses the basic tools for creating geospatial Web applications focusing on three key software products: ArcGIS Online, ArcGIS Experience Builder and ArcGIS Enterprise SDK. Functionalities have been analyzed and compared. This covers advantages and disadvantages of each platform in the context of developing a Web application for the sustainable management of land resources and water bodies at the former Semipalatinsk Test Site in areas planned to be released to the economic turnover. Findings provide a comprehensive insight into the choice of the best tool to efficiently work out geospatial Web applications given specific tasks and specificity of the test site area.

Keywords: STS, Web application, geospatial data, maps, ArcGIS, geoinformation systems, API.

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-104-107>

УДК 581.5:546.11.027*3: 635.63: 582.542.11 (574.41)

UPTAKE OF TIGHTLY BOUND TRITIUM BY PLANTS

E. N. Polivkina*, N. V. Larionova, L.V. Timonova, Ye. S. Syssoeva, A.V. Panitskiy

Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

*E-mail for contacts: polivkina.elena75@gmail.com

A study of the bioavailability of a tightly bound tritium in the soil *in situ* under the conditions of the Semipalatinsk test site (STS) and in a laboratory vegetation experiment was conducted. Significant concentrations of organically bound tritium (OBT) were recorded in *Stipa capillata* plants growing on the territory of the STS. At the same time, tritium in the free water of plant tissues (TFWT) was not detected. In a model experiment using *Cucumis sativus* culture, the specific activity of tightly bound tritium in the composition of the solid phase of the soil and tritiated water (HTO) in the composition of the soil solution at the beginning and at the end of the experiment differed significantly. At the same time, TFWT activity in *Cucumis sativus* was 2 orders of magnitude less compared to the activity of tightly bound tritium in the soil and slightly differed from the activity of tritiated water in the soil solution, which is accessible to the root system of plants. The results of vegetation studies have shown that the direct source of tritium for experimental plants was a soil solution. However, changes in the tritium activity in the soil liquid and solid phases in vegetation vessels indicate that the source of tritiated water in the soil solution was a tightly bound form of radionuclide as a result of leaching processes. It is assumed that the possible causes of leaching of tightly bound radionuclide from the solid phase into the soil solution are the moisture regime, as well as the influence of the rhizosphere of plants.

Keywords: *Semipalatinsk test site, tightly bound tritium, bioavailability, Stipa capillata, Cucumis sativus.*

INTRODUCTION

Tritium is a radioactive form of hydrogen that is produced either naturally in the environment as a result of cosmic ray interactions in the atmosphere, or during normal operation of nuclear facilities and in large quantities in certain types of accidents [1]. The most common forms of tritium in the environment are gaseous (HT, HTO_{steam}, CH₃T), liquid (HTO, T₂O) or organically bound (tritiated organic compounds - carbohydrates, proteins, amino acids, DNA, etc.) [1–3]. These forms of tritium are characterized by ultra-high migration ability both in the trophic structure of the ecosystem and in general in all its compartments. In this connection, the ecological significance of these radionuclide compounds is obvious. However, a special strongly bound form of tritium has been found in the soil of the Semipalatinsk Test Site (STS) near the epicentres of nuclear tests [4, 5]. Moreover, the isotope content in this form in soil reaches significant levels from 5 to 240 kBq/kg [4]. It should be noted that the soil on the migration path of any radionuclides in the terrestrial ecosystem is the main depositing link from which the vegetation cover is able to extract them and, thus, to involve them in further biogeochemical cycles, in particular through the trophic structure. As for the tightly bound tritium compounds, their ecological significance in this aspect is unclear, so the aim of the work was to investigate the bioavailability of this form of the isotope in soil, in order to understand the mechanisms of its migration in the ecosystem.

OBJECTS AND METHODS RESEARCH

The bioavailability of tightly bound tritium was studied *in situ* (directly at nuclear test sites) and in a laboratory vegetation experiment in the STS territory, where areas with high specific activity of tightly bound tritium

have been previously established in the soil cover [4], 16 sites near 5 epicenters of above-ground nuclear tests have been laid down (P-1, P-2, P-3, P-5, P-7). The dominant species of needlegrass was used as an object of study under natural conditions (*Stipa capillata*). Plants were selected from 1 to 2 m² depending on the projective cover of the plots. The mass of the plant samples averaged between 100 and 150 grams.

Soil from technical site P-1 with a known high specific activity of tightly bound tritium was used for the vegetation experiment in laboratory conditions. Soil samples were taken to a depth of 5 cm, then pre-dried, sieved through a sieve (d – 5 mm) and mixed. The total mass of the model soil sample was about 50 kg.

The prepared soil was placed in 20 litre plastic growing vessels. Cucumber culture (*Cucumis sativus*) was used as an experimental plant, which was grown to full maturity. Optimal lighting conditions were maintained using an artificial phyto-lighting system (up to 10 kilolux). Plants were watered with distilled water, maintaining soil moisture at 60% of full water capacity. In the laboratory where the vegetation experiment was conducted, a ventilation system was constantly operating to prevent secondary contamination of the plants with tritium in case the experimental plants transpired or the vegetative vessels evaporated from the soil surface. Therefore, the only possible source of tritium for plants in the experiment was the tightly bound form of the radionuclide in soil. The duration of the experiment was 50 days. Repetition was fivefold.

Soil samples for control of specific tritium activity were taken before planting and at the end of the growing season. The weight of each soil sample averaged 300 g. Plant samples were taken from the aboveground part of

shoots by organs at the end of vegetation period. The weight of each plant sample averaged between 100 and 150 g. To prevent tritium loss, soil and plant samples are immediately packed in zip bags after sampling and stored in a freezer at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ until laboratory tests are performed.

The specific activity of tritium in the free water of plant tissues (TFWT) was measured and in the organic component (organically bound tritium - OBT). In soil samples, the specific activity of the radionuclide was measured in soil solution (tritiated water – HTO) and in the solid phase (tightly bound tritium).

Preparation of soil samples for measurement of specific activity of tritium in soil solution was carried out by distillation at $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ in a desiccator. Then, to extract the tightly bound form of tritium from the soil solid phase, the samples were subjected to autoclave decomposition [5].

Free water extraction from plant tissues was carried out using a special unit [6]. Samples for OBT determination were prepared on a Sample Oxidizer 307 (Perkin Elmer, USA).

The specific activity of tritium was measured by liquid scintillation spectrometry using a spectrometer (Perkin Elmer, USA) [7]. The samples were first passed through a filtration stage to remove mechanical impurities, then a 3 mL aliquot was taken and placed in a 20 ml plastic vial. Then scintillation cocktail was added to the vial in the ratio of 1:4 (sample-to-scintillator ratio). Ultima Gold LLT scintillation cocktail, specially designed for measuring tritium in natural samples, was used to analyze the samples (tritium detection efficiency was about 60% in the range from 0 to 18 keV). The measurement time of each sample was at least 120 minutes. Beta spectra were processed and tritium activity was calculated using Quanta Smart software. The minimum detectable tritium activity for the radiometric instruments used ranged from 4.5 to 7 for OBT and from 2.7 to 5 Bq/kg for HTO.

The quantitative assessment of the bioavailability of strongly bound tritium was carried out indirectly using the OBT/TFWT ratio [3].

RESULTS AND DISCUSSION

Field research

In plant samples of *Stipa capillata* collected from nuclear test sites characterized by high levels of specific activity of tightly bound tritium, free tissue water could not be obtained due to arid growing conditions. At the same time, high values of specific activity of tritium incorporated into organic matter were found in the majority of *Stipa capillata* samples (Table 1).

In general, the values of variation-statistical parameters presented in Table 1 indicate a high variability of OBT concentration in *Stipa capillata*, which is possibly due to the different levels of tritium content in the soil on which the plants grew. This is confirmed by the previously obtained data on the distribution of tightly bound tritium in the soil of the investigated sites [4]. Since organically bound tritium (OBT) in plants is formed only

from tritium in the free water of plant tissues (TFWT) [1–3, 8], its significant concentration in *Stipa capillata* samples indirectly indicates the presence of high TFWT concentrations during certain growth periods.

Table 1. Specific activity of tritium in *Stipa capillata* samples

Selection site	n	Specific activity of organically bound tritium, kBq/kg	
		Average \pm SD*	Range (min-max)
P-1	8	4,4 \pm 4,9	0,8–16
P-2	4	1,00 \pm 0,67	0,3–2
P-3	6	1,00 \pm 0,69	0,3–2,3
P-5	6	0,60 \pm 0,57	0,1–1,6
P-7	7	5,0 \pm 10,8	0,1–29

*Note to Tables 1–3: SD – Standard Deviation

Tritium is known to penetrate the free water of plant tissues by both aerial and root routes [3]. However, according to earlier research [9], tritium was not detected in the surface air of the study area, and there are no surface and underground watercourses that could become a source of the radionuclide. Thus, the source of tritium for *Stipa capillata* could only be the soil cover, which strongly bound tritium is present in high concentrations [4]. At the same time, it should be noted that from the point of view of soil chemistry, tightly bound tritium is not a mobile form of moving [5], respectively, it does not have a direct high bioavailability. Accepting this hypothesis, a modelling experiment using cucumber culture was carried out (*Cucumis sativus*).

Investigations under model laboratory conditions

The values of specific tritium activity in model soil samples before planting and at the end of the vegetation experiment with use are presented in Table 2.

Table 2. Specific activity of tritium in the soil of vegetation vessels

Selection time	n	Specific tritium activity, kBq/kg			
		Solid phase ("tightly bound form")		Soil solution (tritiated water)	
		Average \pm SD	Range (min-max)	Average \pm SD	Range (min-max)
Before planting	5	58,0 \pm 9,4	56–59	0,04 \pm 0,02	0,02–0,05
The end of vegetation	5	40 \pm 9	31–54	0,7 \pm 0,2	0,6–0,9

According to Table 2, the specific activity of tightly bound tritium in the soil solid phase and tritiated water (HTO) in the soil solution at the beginning and at the end of the experiment are significantly different. So, at the end of the experiment, the specific activity of tritium in soil moisture available to plant roots increased by an order of magnitude, indicating the processes of radionuclide leaching from solid phase.

Table 3 presents the results of measuring the specific activity of tritium in the free water of tissues and organic component of the experimental culture of *Cucumis sativus*.

Table 3. Specific activity of tritium in plant samples of *Cucumis sativus*

Indication	n	Activity concentration of ^3H , kBq/kg					
		leaves		stems		fruits	
		TFWT	OBT	TFWT	OBT	TFWT	OBT
Average \pm SD	5	260 \pm 27	17 \pm 11	120 \pm 13	8,0 \pm 3,2	160 \pm 56	17 \pm 14
Range (min–max)	5	240–290	7–29	110–140	4–11	117–220	4–31

As can be seen in Table 3, TFWT activity is an order of magnitude higher than OBT activity. This pattern can be explained by the biochemical origins of tritium, which is bound organically and results from its inclusion in metabolic processes. It should also be noted that the activity of tritium in free water is usually slightly lower than that of the radionuclide in the source [1, 3, 8], due to the simultaneous influence of several factors: equilibrium on the one hand [3] and transpiration loss [1, 3, 10] on the other hand. According to the results of the experiment, TFWT activity in *Cucumis sativus* is 2 orders of magnitude lower than that of strongly bound tritium in soil, and is in the same range as that of tritiated water in soil moisture available to plant root systems. Thus, it is obvious that the direct source of tritium in experimental plants is soil moisture. At the same time, the change in the specific activity in the liquid and solid phases of the soil in the vessels for growing plants at the beginning and at the end of the vegetation experiment (Table 2) showed that the source of tritium for plant roots was a soil solution. Accordingly, this indicates that the strongly bound form of tritium is capable of leaching. It is likely that one of the reasons for these processes could be active moistening of soil during irrigation. Also, chemically active exometabolites of plant roots in the rhizosphere zone could contribute to leaching [11–13]. This assumption is confirmed by studies of the rate of movement and distribution of tritium in soil compartments, including the rhizosphere, the root zone of plants, especially towards the end of the growing season [14].

The value of the OBT/TFWT ratio for *Cucumis sativus* averaged 0.1, which indirectly indicates the weak bioavailability of the radionuclide in a strongly bound form. According to the literature data [1, 3], this range for terrestrial ecosystems with a constant supply of tritium varies from 0.6 to 1.0.

CONCLUSION

Taking into consideration the results of field and laboratory tests, it can be confidently stated that tightly bound tritium has no direct bioavailability to plant roots. Obviously, the bioavailability of tightly bound tritium is indirectly related to the influence of soil water conditions and, possibly, to the exometabolic activity of roots. However, this question is still open and requires further research.

The research was funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant AR19675034 “Study of the radioecological hazard of organically bound tritium when accumulated by farm crops”).

REFERENCES

- Erolle F., Ducros L., Séverine L.D., Beaugellin-Seiller K. An updated review on tritium in the environment // *J. Environ. Radioact.* 2018. – Vol. 181. – P. 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.11.001>
- Shem H.-F., Yao R.-T. Study of ratio of tritium concentration in plants water to tritium concentration in air moisture for chronic atmospheric release of tritium // *Energy Procedia.* 2011. – Vol. 5. – P. 2421–2425. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.416>
- Boyer C., Vichot L., Fromm M., Losset Y., Tatin-Froux F., Guetat P., Badot P.M. Tritium in plants: a review of current knowledge // *Environ. Exp. Bot.* – 2009. – Vol. 67 (1). P. 34–51. <https://doi.org/10.1016/j.envexbot.2009.06.008>
- Timonova L. V., Lyahova O. N., Lukashenko S. N., Ajdarhanov A. O. Issledovanie soderzhaniya tritiya v pochve v mestah provedeniya yadernyh ispytaniy na territorii Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona // *Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya.* – 2015. – Vol. 55. (6). – P. 667–672. <https://doi.org/10.7868/S0869803115050136.5>
- Serzhanova Z.B., Aidarkhanova A.K., Lukashenko S.N. Researching of tritium speciation in soils of “Balapan site” // *J. Environ. Radioact.* – 2018. – Vol. 192. – P. 621–627. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.01>
- Ustrojstvo dlya izvlecheniya vody iz obrazcov. Patent No. 29721. Publ. Patent RK na poleznuyu model' No. 29721; opubl. Astana, 2015. Byul. No. 4. Lukashenko S.N., Larionova N.V., Zarembo V.P. URL: <http://kzpatents.com/4-ip29721-ustrojstvo-dlya-izvlecheniya-vody-iz-obrazcov.html>.
- ISO 9698:2010. Kachestvo vody. Opredelenie ob'yomnoj aktivnosti tritiya. Metod podschyota tsintillyatsiy v zhidkoj srede]. Astana: “KazInSt”, 2010. 32 p.
- Diabate S., Strack S. Organically bound tritium // *Health Phys.* – 1993. – Vol. 65 (6). – P. 698–712.
- Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Larionova N.V. et al Contamination mechanisms of air basin with tritium in venues of underground nuclear explosions at the former Semipalatinsk test // *J. Environ. Radioact.* – 2012. – Vol. 113. – P. 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.02.010>
- Atarashi-Andoh M., Amano H., Ichimasa M., Ichimasa Y. Conversion rate of HTO to OBT in plants // *Fusion Sci. Techn.* – 2002. – Vol. 41 (3). – P. 427–431.
- Polivkina E. N., Artamonova E. N., Kassymova Zh. S., Evlampiyeva E. P., Kabdulkarimova K. K., Kaygusuz M., Omarova N. M. Heavy metals in the rhizosphere of Absinthium (*Artemisia absinthium* L.) in conditions of technogenesis // *Fresenius Environmental Bulletin.* – 2018. – Vol. 27. – P. 9429–9432. https://www.prt-parlar.de/download_feb_2018
- Alengebawy A., Abdelkhalek S.T., Qureshi S.R., Wang M.-Q. Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications // *Toxics.* – 2021. – Vol. 9 (3). – P.42. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
- Curl E., Truelove B. *The Rhizosphere.* Germany: Springer, 1986. – 281 p.
- Melintescu A., Galeriu D. Uncertainty of current understanding regarding OBT formation in plants // *J. Environ. Radioact.* – 2017. – Vol. 167. – p. 134–149. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.11.026>

ҚАТТЫ БАЙЛАНЫСҚАН ТРИТИЙДІ ӨСІМДІКТЕРДІҢ СІңІРУІ

Е. Н. Поливкина*, Н. В. Ларионова, Л. В. Тимонова, Е. С. Сысоева, А. В. Паницкий

ҚР ҰЯО РМК «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

*Байланыс үшін E-mail: polivkina.elena75@gmail.com

Семей сынақ полигоны (ССП) жағдайында және зертханалық вегетациялық тәжірибе барасында *in situ* топырағында тритийдің тығыз байланысқан түрінің биологиялық қолжетімділігіне зерттеу жүргізілді. Ядролық сынақтар жүргізілетін орындарда ССП аумағында өсетін *Stipa capillata* өсімдіктерінде іріктеу кезінде тіндердің бос суында тритий (БСТ) болмаған жағдайда органикалық байланысқан тритийдің (ОБТ) елеулі шоғырлануы тіркелген. *Cucumis sativus* дақылдарын қолданатын модельдік тәжірибеде тәжірибенің басында және соңында топырақ ерітіндісінің құрамындағы топырақтың қатты фазасы мен тритийленген судың (НТО) құрамындағы тығыз байланысқан тритийдің меншікті белсенділігі айтарлықтай ерекшеленді. Сонымен қатар, *Cucumis sativus*-тегі БСТ-нің меншікті белсенділігі топырақтағы тығыз байланысқан тритийдің белсенділігімен салыстырғанда 2 есеге аз болды және өсімдіктердің тамыр жүйесі үшін қол жетімді топырақ ерітіндісіндегі тритийленген судың белсенділігінен сәл өзгеше болды. Вегетациялық зерттеулердің нәтижелері тәжірибелік өсімдіктер үшін тритийдің тікелей көзі топырақ ерітіндісі екенін көрсетті. Алайда, вегетациялық тамырлардағы топырақтың сұйық және тығыз фазасындағы тритийдің меншікті белсенділігінің өзгеруі сілтілеу процестерінің нәтижесінде радионуклидтің тығыз байланысқан түрі топырақ ерітіндісіндегі тритийленген судың көзі болғанын көрсетеді. Тығыз байланысқан радионуклидтің тығыз фазадан топырақ ерітіндісіне сілтіленуінің ықтимал себептері ылғалдандыру режимі, сондай-ақ өсімдік ризосферасының әсері болып табылады.

Түйін сөздер: Семей сынақ полигоны, тығыз байланысты тритий, биологиялық қолжетімділік, *Stipa capillata*, *Cucumis sativus*.

ПОГЛОЩЕНИЕ ПРОЧНОСВЯЗАННОГО ТРИТИЯ РАСТЕНИЯМИ

Е. Н. Поливкина*, Н. В. Ларионова, Л. В. Тимонова, Е. С. Сысоева, А. В. Паницкий

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

*E-mail для контактов: polivkina.elena75@gmail.com

Проведено исследование биологической доступности прочносвязанной формы трития в почве *in situ* в условиях Семипалатинского испытательного полигона (СИП) и в лабораторном вегетационном эксперименте. В растениях *Stipa capillata*, произрастающих на территории СИП в местах проведения ядерных испытаний, зафиксированы значимые концентрации органически связанного трития (ОБТ) при отсутствии трития в свободной воде тканей (ТСВ) на момент отбора. В модельном эксперименте с использованием культуры *Cucumis sativus* удельная активность прочно связанного трития в составе твердой фазы почвы и тритированной воды (НТО) в составе почвенного раствора в начале и в конце эксперимента существенно отличались. При этом удельная активность ТСВ в *Cucumis sativus* была на 2 порядка меньше по сравнению с активностью прочно связанного трития в почве и незначительно отличалась от активности тритированной воды в почвенном растворе, который является доступным для корневой системы растений. Результаты вегетационных исследований показали, что непосредственным источником трития для экспериментальных растений являлся почвенный раствор. Однако, изменения удельной активности трития в жидкой и твердой фазе почвы в вегетационных сосудах указывают на то, что источником тритированной воды в почвенном растворе являлась прочно связанная форма радионуклида в результате процессов выщелачивания. Сделано предположение, что возможными причинами выщелачивания прочно связанного радионуклида из твердой фазы в почвенный раствор является режим увлажнения, а также влияние ризосферы растений.

Ключевые слова: Семипалатинский испытательный полигон, прочно связанный тритий, биологическая доступность, *Stipa capillata*, *Cucumis sativus*.

СПИСОК АВТОРОВ

- Абишева М. Т., 80
Абуова А. У., 24
Абуова Ф. У., 24
Азат С., 34
Айдарханов А. О., 73, 80
Айдарханова А. К., 63, 73
Александрович И. А., 63
Асылбаев Р. Н., 24
Ахмедов А., 24
Байменов А., 34
Баймолданова Л. С., 13
Бакранова Д. И., 4
Баубекова Г. М., 24
Бачурина И. А., 63, 96
Бексейтова К., 34
Боргеков Д. Б., 45
Джумадильдаев А. С., 4
Ермакова Р. Г., 63
Есин А. В., 34
- Жанतिकеев У., 34
Жумажанова А. Т., 45
Загребова А. С., 45
Кабдрахимова Г. Д., 24
Кенесбеков А., 13
Козловский А. Л., 45
Кривицкий П. Е., 63, 80
Кусайнов А., 13
Ларионова Н. В., 63, 80, 96, 104
Мамырбаева А. С., 63, 73
Маулит А., 13
Микаилова Р. А., 89
Михаловский С., 34
Монаенко В. Н., 80, 96
Мукашева С. Н., 55
Мукушева М. К., 89
Мынжасарова Д. А., 55
Оразалиев К. Е., 4
Паницкий А. В., 104
- Полевик В. В., 80
Поливкина Е. Н., 80, 104
Рахадиллов Б. К., 13
Сайлауханулы Е., 34
Серикканов А. С., 4
Скрипников М. В., 63
Сотников Е. В., 73
Спирidonов С. И., 89
Субботин С. Б., 63
Субботина Л. Ф., 80
Сысоева Е. С., 104
Тимонова Л. В., 80, 104
Тлеуканова Ж. Е., 63, 73
Токтаганов Т. Ш., 73
Топорова А. В., 80, 89, 96
Турсумбаева Г. П., 24
Хаметова А. А., 45
Шакирзянов Р. И., 45

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи для публикации в журнале отправляются авторами после регистрации на веб-сайте журнала в электронном виде в формате MS WORD (.docx), а после принятия решения о публикации статьи редакцией (по окончании процесса проверки и рецензирования) – и в виде печатной копии окончательной редакции статьи с согласием авторов на публикацию и их подписями (по почте, курьером и пр. в адрес редакции).

Текст печатается на листах формата А4 (210×297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 20 мм; справа 20 мм, на принтере с высоким разрешением (600–2400 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используйте шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов. Пожалуйста, используйте встроенные стили заголовков (Заголовков 1, 2...) только для названия статьи и заголовков подразделов, и не используйте их для обычного текста, таблиц и подрисованных подписей.

В левом верхнем углу первой страницы должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами, в одном абзаце. После этого печатается текст краткой аннотации на языке статьи (100–3000 символов), и отдельной строкой (после фразы Ключевые слова:) – ключевые слова (5–10). Далее, со следующего абзаца – основной текст, содержащий разделы: Введение, Основную часть и Результаты (возможно, с подразделами), Заключение. После текста статьи приводится список литературы (на языках оригиналов) и блоки «название статьи, аннотация, ключевые слова» на двух оставшихся языках.

Обратите внимание, что ФИО авторов и представляемые организации в статье указывать не нужно, т.к. статьи проходят двойное «слепое» рецензирование. Эту информацию необходимо будет заполнить на трех языках (русском, казахском, английском) в форме на веб-сайте при подаче статьи. Рекомендуем заранее подготовить ее в виде отдельного документа с таблицами по образцу (см. ОБРАЗЕЦ на следующей странице) и приложить к статье.

Для текста статьи используйте одинарный межстрочный интервал, между абзацами не нужно вставлять пустые абзацы и строки.

Не используйте таблицы для расположения иллюстраций и подрисованных подписей, а также средства рисования MS Word поверх иллюстраций.

Максимально допустимый объем статьи – 10 страниц.

При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:

- Окончательная редакция статьи, прошедшая рецензирование и допущенная к публикации, должна содержать блоки на трех языках – казахском, английском и русском, с указанием названия статьи, фамилий, имен, отчеств авторов, полного названия организаций, городов и стран местонахождения, которые они представляют, аннотации (объемом 100–3000 символов, включая знаки препинания и пробелы), и ключевых слов (5–10).
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [...] скобках по мере упоминания. Список литературы приводится по ГОСТ 7.1-2003.
- Пожалуйста, не используйте механизм автоматической нумерации (поля) MS Word для нумерации ссылок на литературу, списков, рисунков и таблиц – используйте обычный текст;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см). Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. Файлы рисунков должны быть представлены отдельно в одном из растровых – .tif, .png (для схем и рисунков с надписями), .jpg (для фото) с разрешением 300 dpi (~1000 px для рисунков шириной 8 см и ~1800 px для рисунков шириной 14 см) или векторных – .svg, .wmf, .emf форматах. Названия файлов должны соответствовать положению в статье (напр. Рисунок 1-a.tif). Для надписей на рисунках предпочтительно использовать шрифт Arial Narrow или аналогичный (узкий шрифт без засечек).
- Математические формулы в тексте должны быть набраны как уравнения MS Word или формулы MathType. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки в тексте.
- Текст должен быть тщательным образом выверен и отредактирован. Бумажная версия статьи должна быть в конце подписана авторами.

К статье прилагаются следующие документы:

- 1) *Сопроводительное письмо от авторов*, в котором должны содержаться сведения о том, что статья может быть опубликована в открытой печати, ранее не была опубликована, не находится на рассмотрении на предмет публикации в других изданиях, статья не содержит информации, способной привести к конфликту интересов.
- 2) *Файлы рисунков*.

Название статьи, аннотация, ключевые слова, а также сведения обо всех авторах статьи заполняются на 3-х языках (русском, казахском, английском) в форме на сайте при подаче статьи (эту информацию также желательно приложить к статье в виде отдельного файла – см. ОБРАЗЕЦ на следующей странице).

Дополнительную актуальную информацию по оформлению, подготовке статей, авторским правам, регистрации можно получить на веб-сайте журнала в разделе **Правила для авторов** (<https://journals.nnc.kz/jour/about/submissions>).

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

ОБРАЗЕЦ

Название статьи (на русском языке)

Таблица 1. Авторы (на русском языке)

Порядковый номер автора статьи	Фамилия	Имя полностью	Отчество полностью (если имеется)	Должность	Ученая степень	Телефон (без скобок, пробелов и дефисов)	Электронная почта	Номера организаций, которые представляет автор (из таблицы 2)
1	Иванов	Иван	Иванович	доцент	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Петров	Петр	Петрович	зав. лаб.	к.ф.-м.н.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на русском языке)

Порядковый номер организации	Наименование	Полный почтовый адрес (индекс, страна, город, улица, дом)	Официальный веб-сайт (если имеется)
1	Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева	010008, Республика Казахстан, г. Нур-Султан, ул. Сатпаева, 2	www.enu.kz
2	Астанинский филиал Института ядерной физики МЭ РК	010008, Республика Казахстан, г. Нур-Султан, пр. Абылай хана, 2/1	www.inp.kz

Название статьи (на казахском языке)

Таблица 1. Авторы (на казахском языке)

Мақала авторының реттік нөмірі	Тегі	Толық аты	Әкесінің толық аты (болса)	Лауазымы	Ғылыми дәрежесі	Телефоны (жақшасыз, бос орынсыз және дефиссіз)	Электрондық поштасы	Автор ұйымдарының нөмірлері (2-кестеден)
1	Иванов	Иван	Иванович	доцент	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Петров	Петр	Петрович	зертхана меңгерушісі	ф.-м.ғ.к.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на казахском языке)

Ұйымның реттік нөмірі	Атауы	Толық пошталық мекенжайы (индекс, ел, қала, көше, үй)	Ресми веб-сайт (болса)
1	Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті	010008, Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ., Сәтпаев көшесі, 2	www.enu.kz
2	ҚР ЭМ Ядролық физика институтының Астана филиалы	010008, Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ., Абылай хан даңғылы, 2/1	www.inp.kz

Название статьи (на английском языке)

Таблица 1. Авторы (на английском языке)

Order number of author's article	Surname	Full Name	Full Middle Name (if any)	Position	Academic degree	Telephone (free of brackets, gaps and hyphens)	E-mail	Numbers of organizations representing by author (from Table 2)
1	Ivanov	Ivan	Ivanovich	Associate professor	PhD	+57771114455	my_mail@mail.ru	1, 2
2	Petrov	Peter	Petrovich	Chief of laboratory	Cand. of Phys. and Math. Sc.	+69992223366	my_mail@google.com	1

Таблица 2. Организации (на английском языке)

Order number of organization	Title	Full post address (zip code, country, city, street, house)	Official web-site (if any)
1	L.N. Eurasian National University	010008, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan, Satpaev st. 2	www.enu.kz
2	Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics ME RK	010008, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan, ave. Abylai Khan, 2/1	www.inp.kz

Примечание: если информация отсутствует – оставляйте соответствующие ячейки таблицы пустыми.

Ответственный секретарь к.ф.-м.н. В.А. Витюк
тел. +7 (722-51) 3-33-35, E-mail: VITYUK@NNC.KZ

Технический редактор И.Г. Перепелкин
тел. +7 (722-51) 3-33-33, E-mail: IGOR@NNC.KZ

Адрес редакции: 180010, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б
<https://journals.nnc.kz/jour>

© Редакция журнала «Вестник НЯЦ РК», 2024

Свидетельство о постановке на учет №17039-Ж от 13.04.2018 г.
Выдано Комитетом информации Министерства информации и коммуникаций Республики Казахстан

Тираж 300 экз.

Выпуск набран и отпечатан в типографии
Национального ядерного центра Республики Казахстан
071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 2Б

