



ЖУРНАЛ
БЕЛОРУССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ЭКОЛОГИЯ

JOURNAL
OF THE BELARUSIAN STATE UNIVERSITY

ECOLOGY

Издается с сентября 2017 г.
(до 2017 г. – «Экологический вестник»)
Выходит 1 раз в квартал

2

2025

МИНСК
БГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

РОДЬКИН О. И. – доктор биологических наук, доцент; директор Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.
E-mail: info@iseu.by

**Заместитель
главного
редактора**

ГЕРМЕНЧУК М. Г. – кандидат технических наук, доцент; заместитель директора по научной работе Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.
E-mail: germenchuk@iseu.by

**Ответственный
секретарь**

ЛОЗИНСКАЯ О. В. – старший преподаватель кафедры общей биологии и генетики Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь.
E-mail: aromia@rambler.ru

Батян А. Н.

Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Головатый С. Е.

Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Голубев А. П.

Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Гричик В. В.

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Дардынская И. В.

Центр всемирного здоровья «Великие озера», Чикаго, США.

Дзятковская Е. Н.

Институт стратегии развития образования Российской академии образования, Москва, Россия.

Дроздович В. В.

Национальный институт рака, США, Бетесда.

Зафранская М. М.

Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.

Кильчевский А. В.

Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.

Коноплев А. В.

Институт радиоактивности окружающей среды университета г. Фукусима, Япония.

Коровин Ю. А.

Обнинский институт атомной энергетики – Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Обнинск, Россия.

Ленгфельдер Э.

Радиологический институт здоровья и окружающей среды им. Отто Хуга, Мюнхен, Германия.

Либерагос Г.

Афинский технический университет, Афины, Греция.

Линге И. И.

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия.

Лукашенко С. Н.

Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия.

Логинов В. Ф.

Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.

Медведев С. В.

ГНУ «Объединенный институт проблем информатики» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.

Набиев И. Р.

Реймский университет, Франция, Реймс.

Степанов С. А.

Международный независимый эколого-политологический университет, Москва, Россия.

Стожаров А. Н.

Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь.

Тарутин И. Г.

ГУ «РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова», Минск, Беларусь.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief	RODZKIN O. I. , doctor of science (biology), docent; International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: info@iseu.by
Deputy editor-in-chief	GERMENCHUK M. G. , PhD (engineering), docent; deputy director for research of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: germenchuk@iseu.by
Executive secretary	LOZINSKAYA O. V. , senior lecturer at the department of general biology and genetics of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University. E-mail: aromia@rambler.ru
<i>Batyan A. N.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Golovaty S. E.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Golubev A. P.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Grichik V. V.</i>	Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Dardynskaya I. V.</i>	Great Lakes Center for Occupational and Environmental Safety and Health, Chicago, USA.
<i>Dziatkovskaya E. N.</i>	Institute of Education Development Strategy of the Russian Academy of Education, Moscow, Russia.
<i>Drozdovitch V. V.</i>	Radiation Epidemiology Branch, DCEG (Division of Cancer Epidemiology and Genetics), National Cancer Institute, Bethesda MD.
<i>Zafranskaya M. M.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Kilchevsky A. V.</i>	National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
<i>Konoplev A. V.</i>	Environmental Radioactivity Institute, Fukushima University, Japan.
<i>Korovin Y. A.</i>	Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russia.
<i>Lengfelder E.</i>	Otto Hug Radiological Institute for Health and Environment, Munich, Germany.
<i>Lyberatos G.</i>	Athens Technical University, Athens, Greece.
<i>Linge I. I.</i>	Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
<i>Lukashenko S. N.</i>	Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia.
<i>Loginov V. F.</i>	National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
<i>Medvedev S. V.</i>	The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus.
<i>Nabiev I. R.</i>	University of Reims Champagne-Ardenne (URCA), France.
<i>Stepanov S. A.</i>	International Independent Ecological and Political University, Moscow, Russia.
<i>Stozharov A. N.</i>	Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus.
<i>Tarutin I. G.</i>	N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, Minsk, Belarus.

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

УДК 81'25:378

РОЛЬ И МЕСТО ПЕРЕВОДЧЕСКОЙ ПРАКТИКИ СПЕЦИАЛИСТА-ЭКОЛОГА НА ЭТАПЕ УГЛУБЛЕННОГО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Т. Г. КОВАЛЕВА^{1), 2)}

¹⁾Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

²⁾Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь,
ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь

Анализируются проблемы, связанные с профессионально ориентированной иноязычной подготовкой специалистов на этапе углубленного высшего образования в сфере экологии: значимость, цели, формы переводческой учебной деятельности в условиях цифровизации образования. Аналитическая работа с аутентичными материалами, связанными с профессиональной деятельностью специалиста, включает изучающее или просмотровое чтение, перевод оригинальных статей, насыщенных специализированной терминологией и общенаучной лексикой. В эпоху электронных переводчиков и словарей такая деятельность изменяет свои формы, но не теряет своей значимости как в плане развития лингвистических и речевых навыков, так и в аспекте профессионального самосовершенствования специалиста. Многолетний опыт работы с обучающимися на этапе углубленного высшего образования, апробация различных подходов к работе с аутентичной литературой в магистратуре позволили разработать определенную технологию аналитического чтения статей по специальности студентов с целью целенаправленного перевода и построения монологического высказывания на основе переведенного текста.

Образец цитирования:

Ковалева ТГ. Роль и место переводческой практики специалиста-эколога на этапе углубленного высшего образования. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;2:4–10.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-4-10>

For citation:

Kovaleva TG. Role and place of translation practice of a specialist-ecologist at the stage of advanced higher education. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;2:4–10. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-4-10>

Автор:

Татьяна Григорьевна Ковалева – кандидат филологических наук; доцент кафедры лингвистических дисциплин и межкультурных коммуникаций¹; профессор кафедры современных языков².

Author:

Tatiana G. Kovaleva, PhD (philology); associate professor at the department of linguistic disciplines and intercultural communications^a; professor at the department of modern languages^b.
kova77@mail.ru

Возможности электронных переводчиков ускорили процесс перевода и оформления вторичных текстов, но не исключили появления стилистических, речевых терминологических ошибок и неточностей. Умение корректировать тонкие нюансы в переводах, связанные с особенностями определенной научной сферы, становится одной из задач обучения в магистратуре. Кроме этого, полученные с помощью электронных переводческих ресурсов вторичные тексты являются основой для создания собственных монологических текстов-резюме, то есть должен быть выполнен обратный перевод вторичного текста к собственному монологу на иностранном языке с использованием лексики и грамматических конструкций первичного текста. Такие умения и навыки необходимо целенаправленно развивать. В настоящем исследовании предлагаются пути и способы формирования комплексных переводческих знаний, умений и навыков, необходимых специалистам при работе с профессионально значимыми аутентичными материалами на иностранном языке с учетом современных цифровых ресурсов. Актуальность проблемы обусловлена необходимостью повышения качества профессионально значимой лингвистической подготовки специалистов в области экологии с учетом современных информационных технологий.

Ключевые слова: переводческая деятельность; аутентичный текст; вторичный текст; коммуникативные навыки; электронные переводчики; педагогическая технология.

Благодарность. Автор выражает благодарность заведующему кафедрой лингвистических дисциплин и межкультурных коммуникаций МГЭИ им. А. Д. Сахарова Н. Н. Довгулевич за конструктивные замечания и предложения по ходу выполнения исследования, проведенного в рамках научно-исследовательской кафедральной темы «Обучение профессиональной коммуникации с учетом особенностей институционального дискурса экологической сферы», а также коллективу кафедры современных языков УГЗ МЧС Республики Беларусь и заведующей Л. Н. Луц за предоставленную возможность проведения педагогических и методических исследований процесса лингвистической подготовки обучающихся на этапе углубленного высшего образования.

ROLE AND PLACE OF TRANSLATION PRACTICE OF A SPECIALIST- ECOLOGIST AT THE STAGE OF ADVANCED HIGHER EDUCATION

T. G. KOVALEVA^{a, b}

^a*International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus*

^b*University of civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus,
25 Mashynabudaŭnikoŭ Street, Minsk 220118, Belarus*

The article deals with the problems associated with professionally oriented foreign language training of specialists in the sphere of ecology at the stage of advanced higher education, in particular, the significance, goals, forms of academic translation activities in the conditions of digitalization of education. Analytical work with authentic materials related to the professional activity of a specialist not only includes studying or deep-in-content reading, but also translation of original articles rich in specialized terminology and general scientific vocabulary. In the era of electronic translators and dictionaries such activity changes its forms, but does not lose its importance both in terms of development of linguistic and speech skills, and in the aspect of professional self-improvement of a specialist. Many years of experience in working with students at the stage of advanced higher education, approbation of various approaches to work with authentic literature in the master's program allowed us to develop a certain technology of analytical reading of articles on students' specialty for the purpose of purposeful translation and construction of a monologic statement on the basis of the translated text. The possibilities of electronic translators have accelerated the process of translation and design of secondary texts, but have not excluded the appearance of stylistic, speech terminological errors and inaccuracies. The ability to correct subtle nuances in translations related to the peculiarities of a certain scientific field becomes one of the tasks of Master's degree programs. In addition, the secondary texts obtained with the help of electronic translation resources are the basis for creating the own monologue texts, i. e. a reverse translation should be performed: a secondary text to one's own monologue in a foreign language using the vocabulary and grammatical constructions of the primary text. Such skills need to be purposefully developed. This article suggests ways and means of forming complex translation knowledge, skills and abilities necessary for specialists when working with professionally significant authentic materials in a foreign language, taking into account modern digital resources. The significance of the problem is due to the need to improve the quality of professionally significant linguistic training of specialists in the field of ecology, taking into account modern information technologies.

Keywords: translation activity; authentic text; secondary text; communicative skills; electronic translators; pedagogical technology.

Acknowledgments. The author extends his gratitude to the Head of the Department of Linguistic Disciplines and Intercultural Communications of the A. D. Sakharov State International Ecological Institute N. N. Dovgulevich for his constructive comments and suggestions in the course of the research conducted within the framework of the research

departmental theme: «Teaching professional communication taking into account the peculiarities of the institutional discourse of the ecological sphere». The author expresses his gratitude to the staff of the Department of Modern Languages of the University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus and the head of the chair L. N. Lutz for the opportunity to conduct pedagogical and methodological research into the process of linguistic training of students at the stage of advanced higher education.

Введение

Переводческая деятельность как процесс преодоления информационных и культурных барьеров продолжает быть востребованной, поскольку теоретические и практические аспекты перевода продолжают интересовать экспертов-экологов, лингвистов и специалистов по межкультурным коммуникациям. Бесспорно, с развитием информационных технологий и разработкой таких мощных цифровых переводческих платформ, как Google translate, DeepL-переводчик, процесс перевода осуществляется значительно быстрее. Однако человеческий фактор при осуществлении профессиональной и межкультурной коммуникации выполняет свою роль как корректор и условие достижения переводческой адекватности и точности. Сознательное и методически целенаправленное использование электронных переводческих ресурсов в деятельности специалистов, профессионально не связанных с лингвистикой, происходит в процессе их повседневного труда, а также учебной деятельности при подготовке к сдаче кандидатского экзамена по иностранному языку. Определение значимости переводческой работы с профессионально необходимыми источниками, разработка методических рекомендаций для грамотного использования возможностей электронных переводческих ресурсов при аналитическом чтении иноязычных научных публикаций является актуальной задачей как в педагогическом аспекте, так и в целях профессионального роста и развития специалистов.

Материалы и методы исследования

В методике обучения иностранным языкам к переводу как одному из видов учебной деятельности относятся по-разному. Как правило, перевод не считают самостоятельным видом речевой деятельности (чтение, восприятие на слух, говорение, письмо). В основных формах переводческой деятельности комбинируются чтение и письмо (письменный перевод), восприятие на слух и говорение (устный перевод). Письменный перевод может быть подробным или реферативным, устный – последовательным или синхронным.

В истории развития методики обучения иностранным языкам существовал период почти полного отказа от перевода, теорию и практику такого подхода развивал английский лингвист и методист Г. Палмер (1877–1949). Придавая особое значение обучению устной речи, он считал, что обучать иностранному языку необходимо натуральным или прямым методом с использованием беспереvodных приемов. Ученик должен был заучивать определенные речевые образцы путем многократного повторения, а затем воспроизводить их в речи [1]. Подход Г. Палмера оправдывает себя на начальном этапе обучения иностранному языку, когда усваивается лексика, значение которой можно изобразить графически или показать жестами (движениями), например, ‘дерево’, ‘книга’, ‘дом’, ‘зеленый’, ‘высокий’. Грамматика отрабатывается на простых структурах, включающих подлежащее, сказуемое, дополнение или обстоятельство. На продвинутом этапе, и тем более в рамках специализированного углубленного высшего образования, обучение иностранному языку без перевода вряд ли возможно, так как должна быть усвоена абстрактная общенаучная и узкая терминологическая лексика, а также сложные грамматические конструкции и модели, значение которых гораздо быстрее и точнее объяснять на родном языке обучающихся. Так, невозможно без перевода объяснить такие специальные термины, как *souche* (французский язык: *штамм*), *surveillance* (французский язык: *мониторинг*); *Abtreibungsmaterial* (немецкий язык: *абортивный материал*), *Eingefrorene Schwangerschaft* (немецкий язык: *замершая беременность*); *bloodstream* (английский язык: *кровеноток*), *mental health* (английский язык: *психическое здоровье*).

В советской высшей школе развивался сознательно-сопоставительный или, по определению И. А. Зимней, сознательно-практический метод [2]. Он основывается на осознании значения лингвистических знаков и их форм с глубоким проникновением в родной язык и сопоставлением языковых явлений родного и иностранного языков. Концепция была разработана известным психологом и методистом Б. В. Беляевым, изложена в его докторской диссертации «Психология владения иностранным языком» в 1959 г. и развита в последующих работах. Примерно до 1980-х гг. главенствующую роль в учебной деятельности в сфере иноязычного высшего образования в нефилологических вузах играли такие виды речевой деятельности, как изучающее чтение и перевод, причем переводы выполнялись вручную с помощью бумажных словарей. Такая деятельность прекрасно развивала лексическую компетенцию, переводческие умения

преобразования оригинального текста и текста перевода. Однако эта работа требовала много времени, терпения и усидчивости.

С 1990-х гг. стал развиваться коммуникативный метод обучения иностранному языку, нацеленный на развитие так называемых коммуникативных компетенций, то есть умений и навыков практического использования иностранного языка в соответствии с ситуациями общения. В рамках коммуникативной методики на международном уровне были разработаны стандартные критерии измерения уровня коммуникативных умений – общеевропейские компетенции владения иностранным языком (Common European Framework of Reference, CEFR). В данном документе компетенции описываются с помощью дескрипторов: «понимаю, могу употребить, могу рассказать, умею описать, могу составить» и др. Умение переводить не включено ни в один из общепринятых уровней и не отнесено к значимым критериям оценки. Но это не умаляет значения этого умения в лингвистическом и общепрофессиональном профиле человека. Обоснуем свою точку зрения, обратившись к понятию 'перевод'.

Самое широкое определение термина дает Интернет: «Перевод – деятельность по интерпретации смысла текста на одном языке (исходном языке [ИЯ]) и созданию нового эквивалентного ему текста на другом языке (переводящем языке [ПЯ])»¹. Более развернутое определение приводится в Большой Российской энциклопедии: «Перевод – это осуществляемое на основе анализа некоторого речевого произведения (оригинального текста) его перекодирование, или вариативное перевыражение его смысла, то есть создание вторичного устного или письменного речевого произведения (перевода, переводного текста), а также само такое произведение»². Исходя из принципов коммуникационного обмена, функция перевода «раскрывается в ситуации информационного общения... как «процесса коммуникации, в ходе которого удовлетворяется сформулированная в виде запроса ожидаемая или предполагаемая информационная потребность» [4]. Из этих определений следуют несколько выводов. Во-первых, перевод требует осуществления определенных действий, а значит нужны умения и навыки в иностранном языке. Во-вторых, необходимо уметь улавливать смысл исходного текста, для этого надо понимать лексику и грамматику. В-третьих, необходимы навыки создания текста перевода (или как его иногда называют, вторичного текста) на родном языке. В-четвертых, характер переводческой работы и тип перевода определяется информационной потребностью. В любом случае нужно иметь лексико-грамматические знания, умения и навыки как в иностранном, так и в родном языке. Кроме этого, необходимы навыки работы со словарями.

С течением времени и расширением обмена научно-технической информацией появились отраслевые терминологические словари, учебные терминологические словари-минимумы, составленные под конкретные дисциплины и тексты. В настоящее время существует огромное количество онлайн и офлайн электронных словарей по самым разнообразным тематикам. Перевод специальных текстов с иностранного языка на родной и обратно выполняется во много раз быстрее. Но значит ли это, что перевод вообще ушел из арсенала техник обучения иностранному языку?

Продвинутые цифровые переводческие ресурсы выполняют такие необходимые технические действия по осуществлению перевода, как поиск переводческого эквивалента, составление фраз и представление вторичного текста на мониторе. Переведенный текст создается быстро и без особых трудозатрат для пользователя. Но, как показывает практика, возникают вопросы по качеству полученного перевода, которое определяется критериями адекватности и эквивалентности. Понятия адекватности и эквивалентности трактуются в научной литературе по-разному. В данной статье принято, что эквивалентность (равнозначность) проявляется в точном соответствии вторичного текста языковой форме и тематическому содержанию текста оригинала; адекватность определяется соответствием вторичного текста ситуации, в которой происходил перевод, и предположениям участников этой ситуации.

Профессиональная деятельность специалистов в области экологии постоянно требует обращения к иностранным источникам. Переводческая деятельность специалистов как вспомогательный вид научной деятельности не теряет своей значимости.

Результаты исследования и их обсуждение

Студенты на уровне углубленного высшего образования должны уметь читать аутентичные тексты по теме своего научного исследования, переводить их, владеть специальной терминологией и уметь рассуждать о своем научном исследовании. Электронные переводчики выполняют всю черновую работу по переводу специальных текстов, но они их не интерпретируют и не реферируют. Поэтому необходимо учить студентов использовать электронный перевод как инструмент получения чернового варианта вторичного

¹Перевод [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения 14.01.2025).

²Большая Российская энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: <https://old.bigenc.ru/linguistics/text/2711891> (дата обращения 14.01.2025).

текста, подлежащего дальнейшей переработке. Слушатели магистратуры обладают предметными знаниями и владеют понятийным аппаратом в области своих профессиональных и научных интересов, поэтому они способны адекватно редактировать и интерпретировать вторичные тексты по специальности, полученные при посредстве электронных переводчиков.

Переводческая деятельность на этапе углубленного высшего образования носит прикладной характер. На кандидатском экзамене одно из заданий включает перевод со словарем как инструмент полного и точного понимания смыслового содержания фрагмента аутентичного текста по направлению научных интересов обучающегося. Магистрант должен самостоятельно читать и переводить научные тексты в рамках своих научных интересов в объеме не менее 120 000 печатных знаков³. Поэтому навыки переводческой деятельности должны отрабатываться в процессе обучения в магистратуре с учетом профессиональных интересов обучающихся (рис.).

Чтобы адекватно переводить и редактировать электронные переводы, магистранту необходимо понимание релевантных запросов, возникающих в сфере научно-технического перевода, которые в свою очередь определяются типологическими признаками текстов-источников [5]. Так, для достижения практических целей переводческой деятельности магистрант должен уметь различать следующие типы аутентичных текстов:

1. Тексты с жесткой структурой и высоко типизированным языковым оформлением: научная статья в рецензируемом профильном журнале, автореферат диссертации, текст диссертации.

2. Тексты с мягкой структурой, допускающие значительную вариативность в языковом оформлении (научно-популярные тексты из Интернета).

3. Научно-технические тексты.

4. Официально-деловые тексты.

5. Описательные тексты.

6. Тексты-доказательства.

7. Тексты-повествования.

8. Тексты-рассуждения.

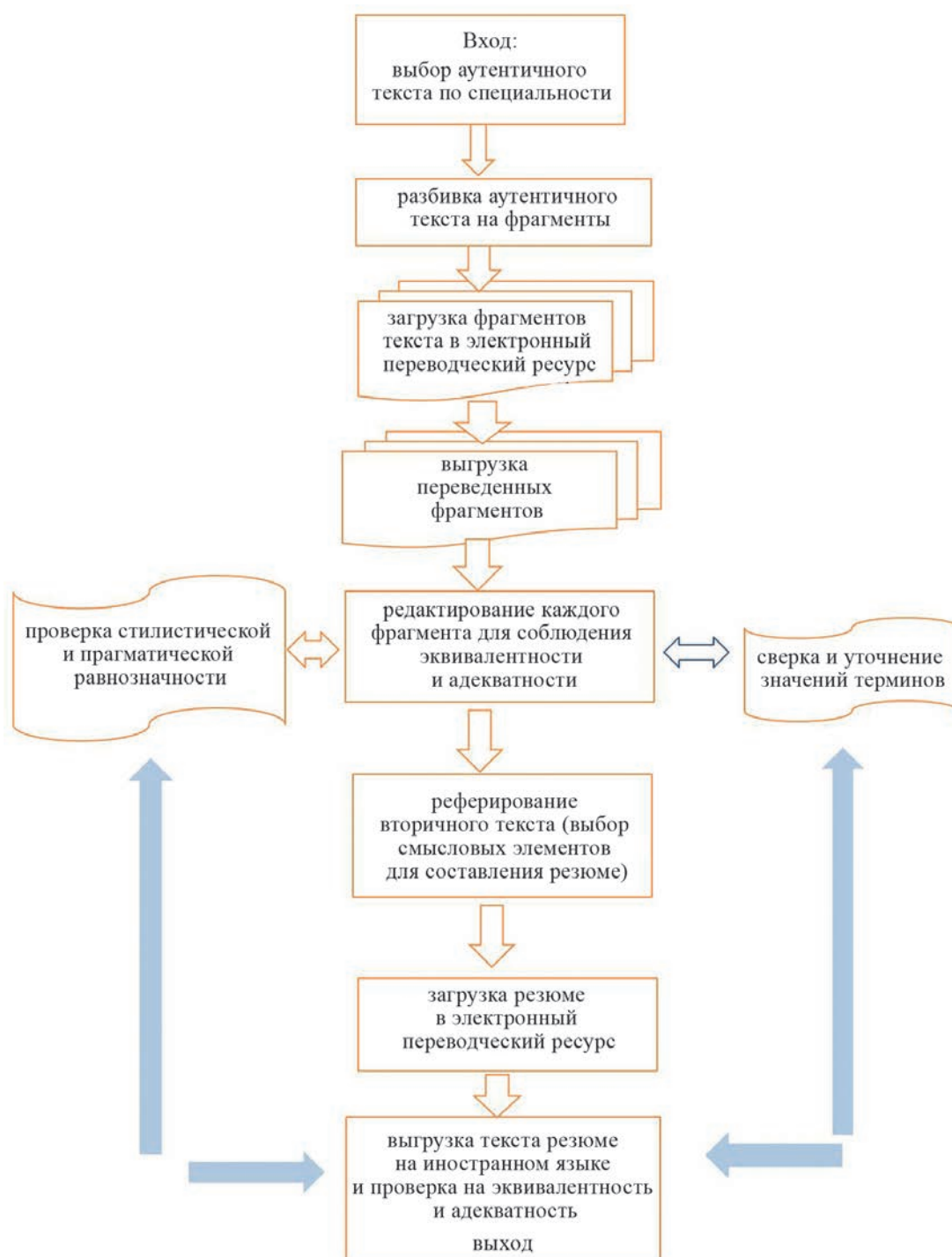
Кроме типа текста, необходимо уметь различать его жанр. В научно-технической литературе существует 33 жанра [5], с которыми специалист может иметь дело в своей практической деятельности (рис.).

В процессе подготовки к кандидатскому экзамену магистранты по различным направлениям экологии и медицинской экологии чаще всего читают и переводят тексты следующих жанров: монография, статья, диссертация, методика, стандарт, нормативный документ, патент. Каждый из этих жанров имеет свои лексические и грамматические особенности, которые необходимо передавать при выполнении или редактировании перевода. Приведем пример перевода заглавия диссертации на немецком языке, выполненного посредством Google переводчика: «Art der Manifestation und Häufigkeit des Auftretens des Post-Covid-Syndroms bei Rekonvaleszenten nach einer Covid-19-Infektion» (*Тип проявления и частота возникновения постковидного синдрома у выздоровевших после инфекции Covid-19*). Во вторичном тексте допущена лексическая ошибка, существительное *выздоровевшие*, которое является субстантивированным причастием, не является нормой для русского языка. Обучающийся должен исправить такой перевод с помощью переводческой трансформации добавления и изменения грамматической формы: *Тип проявления и частота возникновения постковидного синдрома у пациентов, выздоровевших после инфекции Covid-19*. Такая работа представляет собой научное редактирование перевода, полученного посредством машинного переводчика.

Переводческая деятельность магистранта включает два аспекта: перевод иностранного аутентичного текста-источника на русский язык с контролем в процессе экзамена и перевод аннотации к реферату, а также текста презентации своего научного исследования с русского языка на иностранный. Аннотация создается на трех языках: иностранном, русском, белорусском. Все три текста должны совпадать по структуре, стилю и терминологии. Презентация создается только на иностранном языке. Электронный переводчик не всегда справляется с трансформацией грамматических структур или лексических единиц, поэтому магистрант должен уметь увидеть и исправить все ошибки. Так, аннотация на языке оригинала к реферату является безупречной с точки зрения норм немецкого языка: «Das Referat ist der Untersuchung der Mechanismen bei der Entstehung von Komplikationen nach einer Infektion mit SARS-CoV-2 gewidmet. Im Verlauf der Arbeit wurden die häufigsten Komplikationen ermittelt und das Ausmaß des Post-COVID-Syndroms bei Genesenen verschiedener Altersgruppen beschrieben. Der Charakter der Symptome, ihre Dauer und mögliche Zusammenhänge mit der Schwere der Krankheit wurden bewertet, und Risikofaktoren für die Entwicklung von post-COVID-Störungen wurden identifiziert». Вариант электронного перевода звучит уже не так гладко, хотя

³Об утверждении программ-минимумов кандидатских экзаменов и дифференцированного зачета по общеобразовательным дисциплинам : постановление Министерства образования Республики Беларусь от 3 августа 2022 № 223. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22238619p> (дата обращения 15.01.2025).

и передает содержание в целом: *Реферат посвящен изучению механизмов формирования осложнений после перенесенной инфекции, вызванной SARS-CoV-2. В ходе работы определили наиболее распространенные осложнения, описали масштабы постковидного синдрома у реконвалесцентов разных возрастных категорий. Оценили характер симптомов, их длительность, возможную связь с тяжестью заболевания, определили факторы риска развития постковидных нарушений.* Термин 'реконвалесценты' не фиксируется в терминологических немецко-русских и русско-немецких словарях. Неопределенно-личные грамматические конструкции с глаголом прошедшего времени несовершенного вида *определили, описали, оценили* нетипичны для жанра аннотации. Стилистически нормированным является вариант *были определены, описаны, оценены*.



Алгоритм перевода аутентичного текста на иностранном языке с использованием электронных переводческих ресурсов

Algorithm of translating authentic text in a foreign language using electronic translation resources

Специалист способен грамотно отредактировать перевод, обладая предметными знаниями, тонкости которых не различает машина. Например, заголовок статьи с мягкой структурой на французском языке «Deforestation massive des forêts», переведенный с помощью Google-переводчика, выглядит следующим образом *Массовая вырубка лесов*. Обучающийся отредактировал словосочетание следующим образом: *Массовое сведение лесов*. Термин ‘сведение лесов’ трактуется как «вырубка лесов и подлеска в целях увеличения сельскохозяйственных площадей, а также для использования древесины в промышленных или строительных целях», тогда как термин ‘вырубка леса’ означает «превращение земель, на которых находится лес, в уголья, где нет древесного покрова» и имеет более широкое значение. Учитывая содержание статьи, обучающийся сузил значение терминологического словосочетания и передал тему более точно.

По полноте передачи смыслового содержания текста-оригинала и в соответствии с информационной потребностью на углубленном этапе высшего образования реализуются следующие типы переводов: полный (или фрагментарный), перевод без пропусков и сокращений отрывка текста по специальности с целью контроля его понимания, перевод аннотации к реферату и презентации по теме научного исследования; реферативный перевод текста научно-популярного содержания с целью краткого сообщения сведений о реферируемом документе (назначение, тематика, факты, выводы, авторская оценка).

Переводческая деятельность на углубленном этапе высшего образования будет успешной при соблюдении определенного алгоритма работы с аутентичным текстом. Такой алгоритм или определенная последовательность операций является педагогической технологией, так как гарантированно приводит к нужному результату при многократном повторении на разном материале.

Заключение

Несмотря на высокий уровень развития машинных технологий, позволяющих выполнять переводы научно-технических текстов с большой скоростью, переводческая деятельность специалиста не потеряла своей значимости. Электронный ресурс перекодирует текст оригинала по своему алгоритму, который далеко не во всех случаях отражает терминологические тонкости, связанные с быстрым развитием отраслей предметного знания, а также стилистические нюансы, зависящие от личности создателя текста-оригинала; полученные посредством электронного переводчика вторичные тексты не всегда эквиваленты или адекватны. Специалист, который переводит или редактирует аутентичный текст из области своих профессиональных интересов, постоянно учится, совершенствуется и обновляет свою терминологию. Машинный переводчик пока не является самообучающейся платформой и в этом проигрывает человеку.

Библиографические ссылки

1. Палмер Г. *Устный метод обучения иностранным языкам: монография по устным методам обучения иностранным языкам*. Москва: Государственное учебно-педагогическое издательство; 1960. 164 с.
2. Зимняя ИА. *Лингвopsихология речевой деятельности*. Москва: Московский психолого-социальный институт; Воронеж: НПО «МОДЭК»; 2001. 432 с.
3. Пассов И. *Коммуникативный метод обучения иноязычному говорению*. Москва: Просвещение; 1991. 223 с.
4. Ванников ЮВ. *Виды научно-технического перевода: общая характеристика, функции, основные требования*. Москва: [б. и.]; 1988. 70 с.
5. Ванников ЮВ. *Типы научных и технических текстов и их лингвистические особенности*. Москва: ВЦПИ; 1984. Часть 1. 70 с.

References

1. Palmer G. *Ustnyj metod obuchenija inostrannym jazykam. Monografija po ustnym metodam obuchenija inostrannym jazykam* [Oral method of teaching foreign languages. Manuscript on oral methods of teaching foreign languages]. Moscow: Gosudarstvennoe uchebno-pedagogicheskoe izdatel'stvo; 1960. 164 p. Russian.
2. Zimnjaja IA. *Lingvopsihologija rechevoj dejatel'nosti* [Lingvopsychology of speech activity]. Moscow: Moskovskij psihologo-social'nyj institut; Voronezh: NPO «MODJeK», 2001. 432 p. Russian.
3. Passov EI. *Kommunikativnyj metod obuchenija inojazychnomu govoreniju* [Communicative method of teaching foreign language speaking]. Moscow: Prosveshhenie; 1991. 223 p. Russian.
4. Vannikov JuV. *Vidy nauchno-tehnicheskogo perevoda: obshhaja harakteristika, funkcii, osnovnye trebovanija* [Types of scientific and technical translation: general characteristics, functions, basic requirements]. Moscow: [publisher unknown]; 1988. 70 p. Russian.
5. Vannikov JuV. *Tipy nauchnyh i tehnicheskikh tekstov i ih lingvisticheskie osobennosti* [Types of scientific and technical texts and their linguistic features]. Moscow: VCP; 1984. Part 1. 70 p. Russian.

Статья поступила в редакцию 04.04.2025.
Received by editorial board 04.04.2025.

ИЗУЧЕНИЕ

И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY

AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК 595.384.16

ДИНАМИКА ПОПУЛЯЦИЙ ШИРОКОПАЛОГО *ASTACUS ASTACUS*, ДЛИННОПАЛОГО *PONTASTACUS LEPTODACTYLUS* И ПОЛОСАТОГО *FAXONIUS LIMOSUS* РАКОВ В ВОДОЕМАХ БЕЛАРУСИ

А. В. АЛЕХНОВИЧ¹⁾

¹⁾Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам,
ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Беларусь

Оценена скорость роста популяций раков – широкопалого *Astacus astacus*, длиннопалого *Pontastacus leptodactylus* и полосатого *Faxonius limosus*. Годовая скорость увеличения численности максимальна у полосатого рака (3,02 год⁻¹), минимальная – у широкопалого (1,44 год⁻¹). Выживаемость раков от личинок до достижения половой зрелости максимальна у длиннопалого рака (1,5 %), минимальная – у полосатого (0,4 %). Плодовитость перед выклевом личинок у полосатого рака в сравнении с аборигенными видами выше в 2,2 раза, но выживаемость молоди до достижения половой зрелости ниже в 3,6 раза. Преимущество, которое полосатый рак мог бы иметь из-за высокой плодовитости, на этапе роста и развития особей полностью исчезает. Численность половозрелых самок и их плотность обеспечивают ежегодное пополнение в гораздо больших масштабах. Основным критерием конкурентных преимуществ сравниваемых видов является скорость увеличения численности популяций. Этот показатель максимален у *Faxonius limosus*.

Ключевые слова: десятиногие раки; пресноводные экосистемы; скорость роста численности популяций.

Благодарность. Автор выражает признательность сотрудникам ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам» К. Сливинской и Д. В. Молоткову за помощь в сборе материала в совместных экспедициях, которые во многом способствовали появлению данной работы.

Образец цитирования:

Алехнович АВ. Динамика популяций широкопалого *Astacus astacus*, длиннопалого *Pontastacus leptodactylus* и полосатого *Faxonius limosus* раков в водоемах Беларуси. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2025;2:11–21.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-11-21>

For citation:

Alekhovich AV. Population dynamics of noble *Astacus astacus*, narrow-clawed *Pontastacus leptodactylus* and spiny-cheek *Faxonius limosus* crayfish in water bodies of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;2:11–21. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-11-21>

Автор:

Анатолий Васильевич Алехнович – кандидат биологических наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории гидробиологии.

Author:

Anatoly V. Alekhovich, Phd (biology), docent; leading researcher at the laboratory of hydrobiology.
alekhnovichav@gmail.com

POPULATION DYNAMICS OF NOBLE *ASTACUS ASTACUS*, NARROW-CLAWED *PONTASTACUS LEPTODACTYLUS* AND SPINY-CHEEK *FAXONIUS LIMOSUS* CRAYFISH IN WATER BODIES OF BELARUS

A. V. ALEKHNOVICH^a

^aScientific and Practical Center for Bioresources of the National Academy of Sciences of Belarus,
27 Akademičnaya Street, Minsk 220072, Belarus

The growth rate of crayfish populations has been estimated – noble *Astacus astacus*, narrow-clawed *Pontastacus leptodactylus*, and spiny-cheek *Faxonius limosus*. The annual population growth rate of spiny-cheek crayfish was highest (3.02 year⁻¹) and noble crayfish had lowest rate (1.44 year⁻¹). Crayfish survival from larvae to sexual maturity was highest for the narrow-clawed crayfish (1.5 %) and lowest for the spiny-cheek crayfish (0.4 %). Pre-hatching fecundity of the spiny-cheek crayfish was 2.2 times higher than that for native species, but juvenile survival to sexual maturity was 3.6 times lower. The advantage that the spiny-cheek crayfish could have due to its high fecundity at the stage of growth and development of individuals completely disappears. The number of sexually mature females and their density ensure annual replenishment on a much larger scale. The main criterion of competitive advantages of the compared species is the rate of population increase. This indicator was maximal for *Faxonius limosus*.

Keywords: decapods; freshwater crayfish; population growth rate.

Acknowledgments. The author expresses his deep gratitude to employees of the Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Bioresources – K. Slivinska, D. V. Molotkov for help to sample specimens during joint expeditions that largely contributed to the appearance of this work.

Введение

В Беларуси обитает три вида речных раков: два аборигенных – широкопалый *Astacus astacus* (Linnaeus, 1758), длиннопалый *Pontastacus leptodactylus* (Eschscholtz, 1823) и один инвазивный полосатый *Faxonius limosus* (Rafinesque, 1817). Характерной особенностью динамики численности популяций этих видов является быстрое исчезновение широкопалого рака, колебания численности длиннопалого рака в широких пределах и быстрое распространение и увеличение численности чужеродного инвазивного вида полосатого рака.

В популяциях, где отсутствует иммиграция и эмиграция, динамика численности определяется возрастной структурой и величинами рождаемости и смертности особей.

Поскольку рост популяции ограничен ресурсами, то скорость ее роста не остается постоянной и меняется в соответствии с правилами логистического роста. В общем виде это выглядит так – медленное увеличение численности в условиях чрезвычайно низкой плотности по мере нарастания численности вызывает быстрое увеличение скорости. На этом участке ее можно описать экспоненциальной зависимостью с постоянной удельной скоростью и далее – из-за ограниченности ресурсов, происходит замедление роста численности.

Цель исследования – сравнить скорости роста численности популяций широкопалого, длиннопалого и полосатого раков в фазе их экспоненциального роста.

Материал и методы исследования

Для сравнения были взяты популяции длиннопалого рака в оз. Олтушское (Малоритский р-н, 51.6910038N, 23.9550447E), широкопалого рака в старом карьере кирпичного завода (Молодечненский р-н, 54.333421N, 26.701389E) и популяция полосатого рака в песчаном карьере в окрестности д. Михневичи (Сморгонский р-н, 54.439950N, 26.534751E).

Отбор проб для широкопалого проводился в мае 2020 г., длиннопалого – мае 2005 г., для полосатого в начале июля 2021 г. Раков отлавливали раколовками, которые состояли из двух мереж и сетной вставки между ними, их описание представлено в работе [1]. Раколовки использовались без приманки. Средняя площадь, облавливаемая за сутки одной раколовкой, составляла 20 м², коэффициент уловистости принят равным 0,5 [2].

Для изучения размерно-возрастной структуры анализировались уловы, численность раков в которых была порядка 100–200 особей.

Расшифровка размерной структуры и определение возрастных классов начиналась с определения модальных значений длины раков в отдельных возрастных классах. Для этих целей общие сведения по размерно-возрастной структуре популяции длиннопалого рака взяты из работы [3] широкопалого рака – из [4], полосатого рака – из [5]. Уточнение границ возрастных классов широкопалого, длиннопалого

и полосатого раков проводилось по анализу частотно-размерного распределения особей в популяциях конкретных водоемов, учитывая, что в пределах каждого возрастного класса размеры особей распределены в соответствии с законом нормального распределения. На общей размерной кривой частотного распределения каждой из видовых популяций отдельные возрастные группы будут выглядеть в виде участков прямых, которые интерпретируются как возрастные [6].

Поскольку пополнение популяции определяется самками, расчеты численности особей проведены только для самок. После выделения возрастных классов вся численность самок перераспределялась в соответствии с долей отдельных возрастных классов в общей размерной структуре облавливаемой части популяции. Далее рассчитывали плотность особей отдельных возрастных классов.

Для оценки общей численности самцов и самок количество самок умножали на два, предполагая равное соотношение полов [3].

Раков измеряли от острия рострума до конца тельсона.

Из-за селективности орудий лова, различий в распределении и поведении разновозрастных особей, длиннопалый и широкопалый раки возраста один-два года и полосатый рак в возрасте 1+ года, не облавливались или облавливались не в полной мере. Поэтому размерная структура уловов имела колоколообразную кривую распределения с восходящей левой ветвью и нисходящей правой (рис. 1). Данные по плотности самок в отдельных годовых классах считались репрезентативными, если численность последующего возрастного класса была меньше предыдущего.

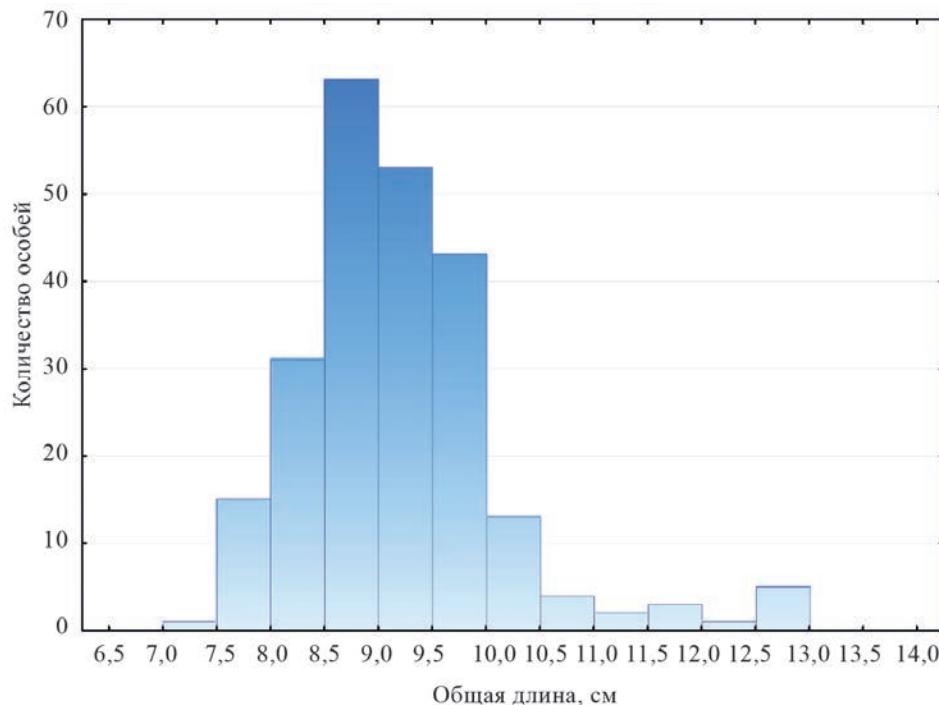


Рис. 1. Размерная структура самок длиннопалого рака в популяции оз. Олтушское, собранных 20 мая 2005 г.

Fig. 1. Size structure of female narrow-clawed crayfish in the population of Lake Oltushskoe, collected on May 20, 2005

После выделения возрастных групп и определения плотности, анализировалась убывь особей в правой нисходящей ветви размерного ряда, в которой численность особей убывала с увеличением возраста самок, что рассматривалось как отражение реальной убыли особей с увеличением размеров и возраста самок.

Для определения значений общей мгновенной смертности (Z) возрастных групп самок половозрелой части популяции использовалась линейная зависимость между натуральным логарифмом плотности самок как зависимой переменной и соответствующим возрастом как независимой переменной, а коэффициент наклона (угловой коэффициент) дает нам значение мгновенной смертности. Полевые данные по динамике размерно-возрастной численности самок были скорректированы в соответствии с полученными общими зависимостями.

Выживаемость (S) определяли как e^{-Z} , где e – основание натурального логарифма.

Плодовитость самок определяли в конце эмбрионального развития яиц, подсчитывая все яйца на плеоподах самок разной длины. Затем определялась зависимость плодовитости от длины самок и оценивалась их средняя плодовитость конкретных размерно-возрастных классов (f_x). Плодовитость самок перед выклевом личинок приравнена к количеству производимых самкой личинок первой стадии.

Плодовитость перед выклевом личинок у полосатого рака взята из работы [7].

Годовое пополнение или чистую скорость размножения (R) определяли умножением плотности самок (d_x) отдельных возрастных групп на их плодовитость перед выклевом личинок (f_x) и складывали полученные значения для всех возрастных групп половозрелых самок:

$$R = \sum d_x f_x.$$

Время генерации (T) или средний возраст, в котором самки в популяции воспроизводят потомство, определяли как сумму пополнения отдельных возрастных классов умноженную на возраст самок ($\sum d_x f_x x$) и деленную на общее годовое пополнение:

$$T = \sum d_x f_x x / \sum d_x f_x.$$

Годовую скорость роста популяции (λ) оценивали, возведя суммарное значения пополнения (R) в степень, обратную среднему времени генерации (T), по формуле

$$\lambda = R^{1/T} [8].$$

Результаты исследования и их обсуждение

Исходные данные по плотности самок полосатого рака в возрасте 2–4 года (табл. 1) легли в основу определения годовой убыли половозрелых самок (рис. 2).

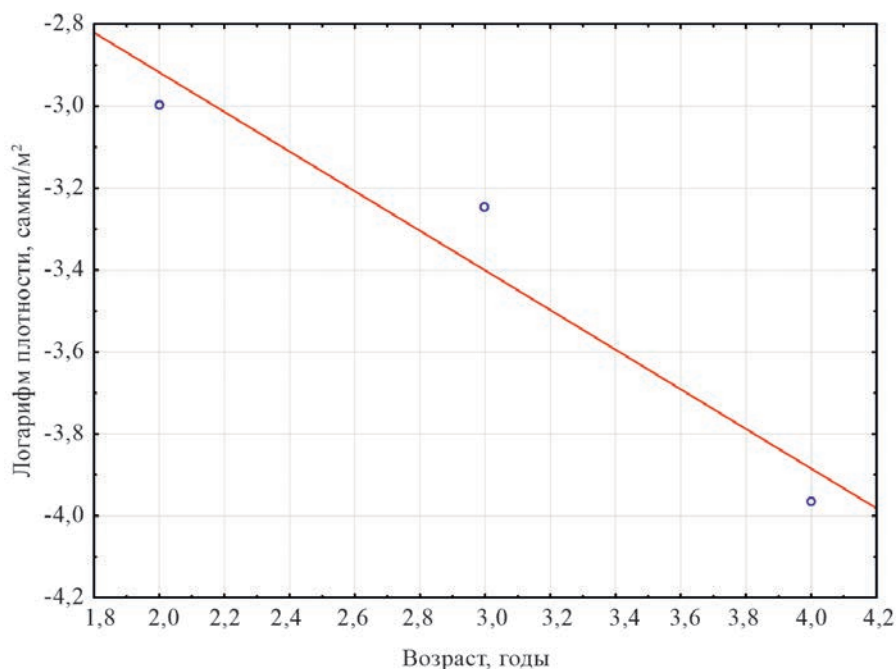


Рис. 2. Натуральный логарифм плотности самок в зависимости от возраста в популяции полосатого рака песчаного карьера

Fig. 2. Natural logarithm of female density as a function of age in a sand quarry spiny-cheek crayfish population

Зависимость описывается уравнением:

$$\ln D = -1,9497 - 0,4838 \cdot t; r = -0,96; p = 0,17, \quad (1)$$

где D – плотность самок, t – возраст самок.

Линейная зависимость характеризуется высоким коэффициентом корреляции, но статистическая достоверность низкая, что объясняется малой выборкой, равной трем возрастным классам.

Выживаемость половозрелых самок (S) полосатого рака равна 0,6164 или 61,6 % ($S = e^{-0,4838} = 0,6164$).

Популяционные параметры полосатого рака представлены в табл. 1.

Суммарное годовое пополнение (R) от всех самок популяции составит 24,11 личинок/м².

Суммарное значение произведений возраста самок на ожидаемое число потомков равно 69,38.

Среднее время генерации $T = 2,88$ лет ($69,38/24,11$).

Увеличение численности за год $\lambda = 3,02$ раза ($24,11^{1/2,88}$).

От количества личинок до половой зрелости самок в возрасте два года доживает 0,4 % особей. При определении этой величины плотность самок в возрасте двух лет равную 0,054 самок/м² умножили на два, считая, что соотношение полов в популяции составляет 1:1.

Исходные данные по плотности самок длиннопалого рака в оз. Олтушское в возрасте 3–7 лет (табл. 2) легли с основу определения годовой убыли половозрелых самок (рис. 3).

Таблица 1

Популяционные показатели самок полосатого рака в песчаном карьере в окрестностях д. Михневичи

Table 1

Population indices of female spiny-cheek crayfish in a sand quarry in the vicinity of the village of Mikhnevichi

Возраст, годы (x)	1	2	3	4
Средняя длина, см	–	7,3	9,0	10,2
Плотность самок по уловам ловушек, самок/м ²		0,05	0,039	0,019
Расчетная плотность по уравнению 1, самок/м ² (d _x)		0,054	0,033	0,020
Плодовитость перед выклевом личинок [7] (f _x)		172	257	317
Пополнение, инд./м ² (d _x f _x)		9,29	8,48	6,34
Пополнение умноженное на возраст самок (d _x f _x x)		18,58	25,44	25,36

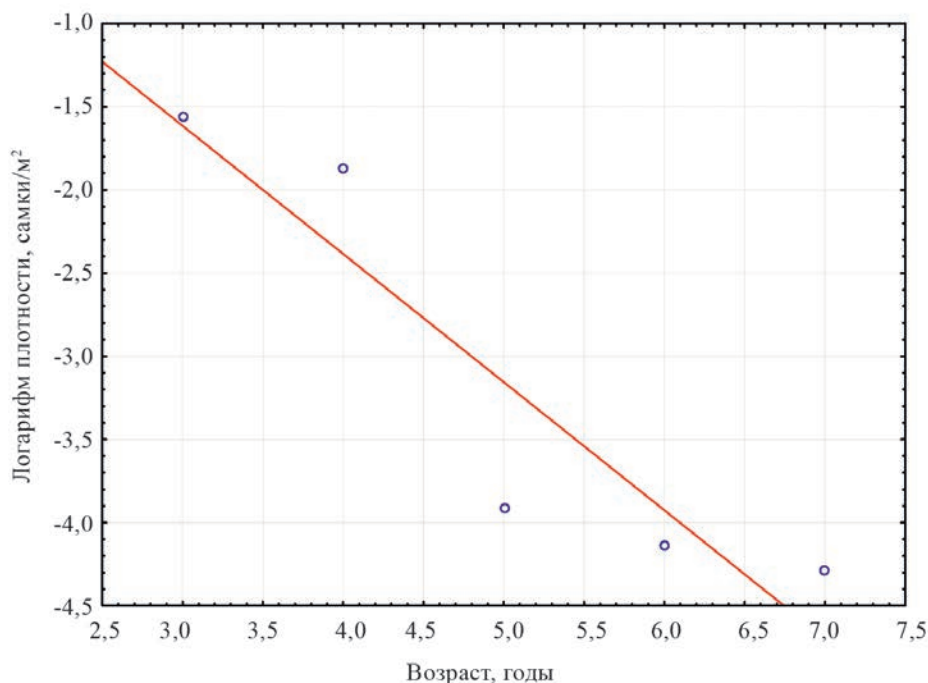


Рис. 3. Натуральный логарифм плотности самок в зависимости от возраста в популяции длиннопалого рака в оз. Олтушское

Fig. 3. Natural logarithm of female density as a function of age in the narrow-clawed crayfish population in Lake Oltushskoye

Зависимость описывается уравнением:

$$\ln D = 0,6962 - 0,7704 \cdot t; r = -0,92; p = 0,03, \quad (2)$$

где D – плотность самок, t – возраст самок.

Зависимость логарифма плотности от возраста самок статистически достоверна. Выживаемость половозрелых самок (S) длиннопалого рака равна 0,4628 или 46,3 % ($S = e^{-0,7704} = 0,4628$).

По уравнению 2 рассчитаны популяционные показатели плотность самок (табл. 2).

Плодовитость в зависимости от длины самок длиннопалого рака перед выклевом личинок в оз. Олтушское описывается уравнением:

$$E = -187,6055 + 27,8622 \cdot TL; r = 0,6325; p = 0,0009, \quad (3)$$

где E – плодовитость перед выклевом личинок, TL – длина самки, см.

Таблица 2

Популяционные показатели самок длиннопалого рака в оз. Олтушское

Table 2

Population indices of female narrow-clawed crayfish in Lake Oltushskoye

Возраст, годы (x)	1	2	3	4	5	6	7
Средняя длина, см		7,3	8,6	9,5	10,6	11,9	12,9
Плотность самок по уловам ловушек, самок/м ²			0,209	0,153	0,020	0,016	0,008
Расчетная плотность по уравнению 2, самок/м ² (d _x)			0,199	0,092	0,043	0,020	0,009
Плодовитость перед выклевом личинок (f _x)			52	77	108	144	172
Пополнение, инд./м ² (d _x f _x)			10,35	7,08	4,64	2,88	1,55
Пополнение умноженное на возраст самок (d _x f _x x)			31,05	28,32	23,20	17,28	10,85

Суммарное пополнение (количество личинок) составит 26,50 особей/м². Выживаемость от личинки до возраста 3 года будет 1,5 %, поскольку, как и для полосатого рака, плотность самок длиннопалого рака умножали на 2, считая соотношение полов равным.

Сумма произведений возраста самок на количество личинок в данном возрасте составит 111,15 разделив ее чистую скорость размножения (26,50), получаем среднее время генерации равное 4,19 года.

Годовая скорость роста популяции будет 2,19 ($26,5^{1/4,19} = 2,19$).

Данные по плотности самок широкопалого рака карьеров кирпичного завода в возрасте 3–6 лет (табл. 3) легли с основу определения годовой убыли половозрелых самок (рис. 4).

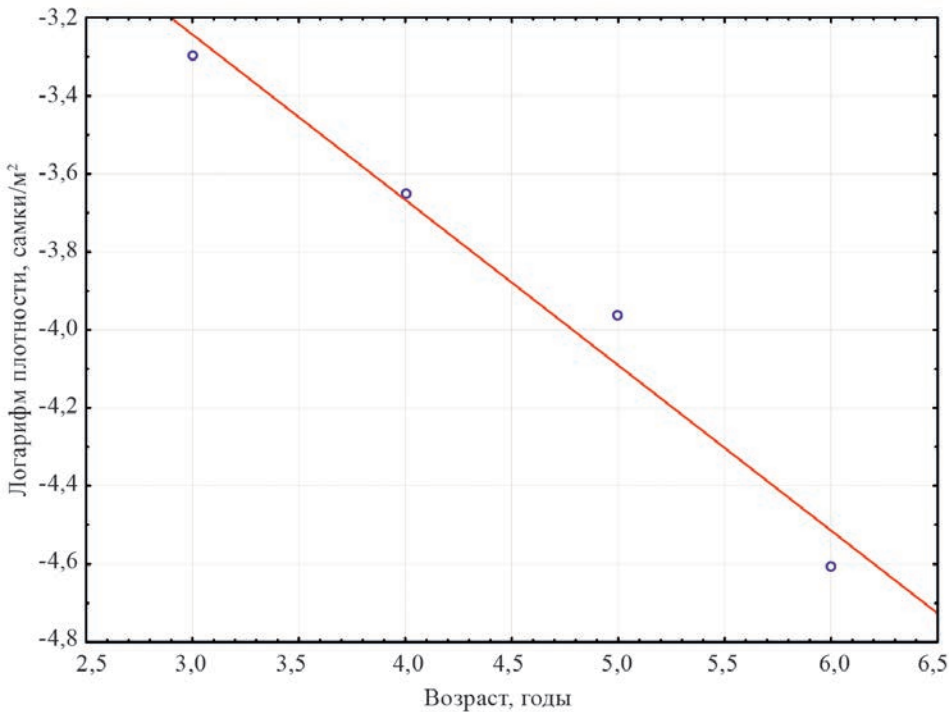


Рис. 4. Натуральный логарифм плотности самок в зависимости от возраста в популяции широкопалого рака карьера кирпичного завода

Fig. 4. Natural logarithm of female density as a function of age in a population of noble crayfish from a brickyard quarry

Зависимость описывается уравнением:

$$\ln D = -1,9713 - 0,4239 \cdot t; r = -0,98; p = 0,01, \tag{4}$$

где D – плотность самок, t – возраст самок.

Значение общей мгновенной смертности половозрелых самок широкопалого рака в карьере равно $-0,4239 \text{ год}^{-1}$.

Выживаемость половозрелых самок при переходе в следующий годовой класс составит: $S = e^{-0,4239} = 0,6545$, или 65,4 %.

Плодовитость в зависимости от длины самок широкопалого рака перед выклевом личинок в карьере описывается уравнением:

$$E = -126,08 + 26,156 \text{ TL}; r = 0,61, p = 0,04, \quad (5)$$

где E – плодовитость перед выклевом личинок, TL – длина самки, см.

Таблица 3

Популяционные показатели самок широкопалого рака карьера старого кирпичного завода

Table 3

Population indices of female noble crayfish from the quarry of the old brick factory

Возраст, годы (x)	1	2	3	4	5	6
Средняя длина, см			7,8	8,6	9,4	10,4
Плотность самок по уловам ловушек, самок/м ²			0,037	0,026	0,019	0,010
Расчетная плотность по уравнению 4, самок/м ² (d_x)			0,039	0,026	0,017	0,011
% яйценосных самок			20	60	100	100
Плодовитость (f_x)			78	99	120	146
Пополнение, инд./м ² ($d_x f_x$)			0,61	1,54	2,04	1,61
Пополнение умноженное на возраст самок ($d_x f_x x$)			1,83	6,16	10,20	9,66

Годовое пополнение составит 5,8 инд./м². Общая плотность самок широкопалого рака в карьере, начиная с возраста 3 года, будет 0,093 самок/м². От личинок до начала половой зрелости в возрасте 3 лет доживает 1,3 % особей, до возраста 4 года – 0,9 %.

Сумма произведения возраста на количество личинок в конкретных возрастах составит 27,85, разделив ее чистую скорость размножения (5,80), получаем среднее время генерации равное 4,80 года.

Годовая скорость роста популяции будет $5,80^{1/4,80} = 1,44$.

За год популяции широкопалого рака в состоянии увеличить свою численность в 1,44 раза.

Результаты исследования и их обсуждение

Оценены динамические показатели аборигенных раков *A. astacus*, *P. leptodactylus* и инвазивного *F. limosus*. Годовая смертность раков облавливаемой ловушками части популяции изучалась путем оценки доли убыли смежных возрастных классов. Такой метод оценки смертности приемлем только для стабильных популяций, где соотношение раков в смежных возрастных классах остается постоянной. В нашем случае этот подход предполагает постоянство пополнения половозрелой части популяции и постоянное снижение численности с увеличением возраста особей. Популяция может рассматриваться как стабильная, если логарифмы плотности самок отдельных поколений в зависимости от возраста параллельны, что и было отмечено для популяции длиннопалого рака оз. Соминское [9]. Для популяций широкопалого и полосатого раков сделано аналогичное предположение.

Стабильность популяции определяется относительным постоянством пополнения с постоянством смертности. Обратная связь определяется усилением смертности молоди при увеличении плотности раков из-за каннибализма и недостатка убежищ, что увеличивает смертность половозрелых особей в случае высокой плотности последних. При высокой плотности помех, которые создают самцы в период откладки самками яиц на плеоподы, ведет к значительным потерям яиц. Потери яиц за время вынашивания кладки могут достигать до 50 % [10], в достаточно благоприятных условиях они не превышают 10 % [11]. Эти и другие механизмы обратных связей в популяциях раков обеспечивают стабильность возрастной структуры их половозрелой части, что делает возможным использование предлагаемого метода оценки смертности половозрелых особей.

В границах плотностей, которые представлены в работе, годовая скорость роста численности, время генерации и доля особей достигших половой зрелости не будут зависеть от плотности популяции.

О предельной емкости среды можно судить по максимальной плотности раков отдельных видов. Так, у полосатого рака в зарослях макрофитов в Польше она может достигать 77 инд./м² [5], а в Италии до 16,7 инд./м² [12]. У *A. astacus* и *P. leptodactylus* в водоемах Беларуси она не превышала 5 инд./м². В представленной работе предельная емкость среды не достигнута ни одним из рассматриваемых видов. Ростové потенции в популяциях реализуются в полной мере.

С учетом самцов, численность которых принята равной самкам, плотность половозрелых особей находилась в границах 0,186–0,726 инд./м². Такая плотность достаточно далека от предельной емкости среды. Рассматриваемые популяции являются растущими. На кривой роста численности они находятся на участке с высокой скоростью роста численности. В полулогарифмическом масштабе этот участок роста численности аппроксимирован прямой, что и позволило определить смертность половозрелых самок. Значения годовой скорости роста на этом участке близко, но не равно максимальной скорости роста.

Для целей исследования важное значение имеет правильная оценка размерной и возрастной структуры. Для этого контрольная выборка особей должна быть многочисленной [13], что в определенной степени снижает случайные отклонения малых чисел от общей закономерности, а улов идентично отображать размерную структуру популяции.

Необходимо использовать орудия лова, которые адекватно отражают размерную структуру популяции. В данной работе использовались раколовки без приманки. В них раки попадают в результате двигательной активности. В то время как в раколовках с приманкой средние размеры особей статистически достоверно были больше на 1,5 см в сравнении с применяемыми без приманки. Следовательно, размерная структура уловов раколовки без приманки точнее отражает существующую в популяции возрастную структуру. Отметим, что только полный отлов всех раков с осушенного участка водоема позволяет точно определить размерно-возрастную структуру раков всех возрастных групп [14].

В табл. 4 обобщены популяционные показатели исследуемых видов.

Таблица 4

Популяционные показатели широкопалого, длиннопалого и полосатого раков в изученных водоемах

Table 4

Population indices of noble, narrow-clawed and spiny-cheek crayfish in the studied water bodies

Вид	<i>Astacus astacus</i>	<i>Pontastacus leptodactylus</i>	<i>Faxonius limosus</i>
Плотность половозрелых самок/м ² ($\sum d_x$)	0,093	0,363	0,107
Годовое пополнение инд./м ² ($R = \sum d_x f_x$)	5,80	26,50	24,11
Выживаемость от пополнения до половой зрелости, %	1,1*	1,5	0,4
Годовая выживаемость половозрелых самок, %	65,4	46,3	61,6
Среднее время генерации ($T = \sum d_x f_x x / \sum d_x f_x$)	4,80	4,19	2,88
Годовая скорость увеличения численности ($\lambda = R^{1/T}$)	1,44	2,19	3,02

Примечание. *Выживаемость определялась как средняя величина для половозрелых самок в возрасте 3 и 4 года.

Годовое пополнение минимально у широкопалого рака, в то время как у длиннопалого и полосатого оно вполне сопоставимо. Годовое пополнение определяется плотностью самок и их индивидуальной плодовитостью. Плодовитость является эволюционно сложившейся адаптацией к высокой смертности молоди в период роста и развития. Для отдельных видов плодовитость достаточно стабильная величина. У широкопалого рака в меняющихся условиях меняется скорость роста, но плодовитость характеризуется высоким постоянством [15], обнаруженные отклонения достаточно редки [16]. У длиннопалого рака водоемов Беларуси плодовитость за очень редким исключением также стабильно постоянная [11]. Другая составляющая годового пополнения – плотность самок является величиной изменчивой и у отдельных популяциях может различаться в 100 раз, что позволяет утверждать – годовое пополнение определяется плотностью половозрелых самок. Максимальная плотность ограничена предельной емкостью среды. Следовательно, годовое пополнение или чистая скорость размножения и емкость среды взаимосвязанные величины.

У рассматриваемых видов выживаемость молоди раков от времени появления личинок до достижения половой зрелости очень низкая, максимальна она у длиннопалого рака, минимальна у полосатого. Преимущество, которое полосатый рак мог бы иметь из-за высокой плодовитости на этапе роста и развития, плотностью исчезает. Плодовитость перед выклевом личинок у полосатого рака в сравнении с аборигенными видами выше в 2,2 раза (считая по среднему значению для возрастных классов), но выживаемость молоди до достижения половой зрелости ниже в 3,6 раза. Рассматривать гораздо большую плодовитость полосатого рака в сравнении с аборигенными видами (как критерий его конкурентных преимуществ) нет оснований.

Численность половозрелых самок, их плотность обеспечивают ежегодное пополнение в гораздо больших масштабах, нежели плодовитость. Если переходить к предельной плотности особей, то преимущества будут получать виды, у которых большая емкость среды. Она максимальна у полосатого рака, что и дает этому виду конкурентные преимущества в сравнении с аборигенными видами.

В половозрелой части популяций для всех сравниваемых видов выживаемость самок различается незначительно и вполне сопоставима.

В немногочисленных работах, где отмечается естественная смертность раков, ее значения приводятся без объяснений способа расчета. Авторы, не вдаваясь в детали расчетов, считают возможным принять коэффициент естественной смертности сеголетков широкопалого рака равным 0,7 [17] или 0,9 [18]. Смертность молоди широкопалого рака в первое лето роста оценивается в 90 % [19], но в зимний период в условиях эксперимента с избытком корма и отсутствия хищников смертность ювенильных особей составила 9,2 % [20]. В период промысла смертность широкопалого рака составляет 28–66 % [21].

Выживаемость длиннопалого рака от личинки II стадии до возраста два года составила 1,04 % [22]. Выживаемость половозрелых особей за временной интервал равный одному году колеблется в значениях 49–52 % [9; 23].

Высокая смертность молоди полосатого рака отмечена в эксперименте [24], за зиму на первом году жизни смертность *F. limosus* может достигать до 88 % [25].

Как видим, колебания смертности значительны, а представленные в табл. 4 данные по смертности раков от выклева личинок до половой зрелости находятся в достаточно реальных границах.

Существенное преимущество получает полосатый рак при сравнении среднего времени генерации. У полосатого время генерации ниже в 1,6 раза в сравнении с аборигенными видами и, как следствие, годовая скорость увеличения численности выше в 1,4 раза.

Годовая скорость роста включает и пополнения, и выживаемость половозрелых особей, но в определенных пределах не зависит от плотности особей. Зависимая от плотности скорость увеличения численности будет регистрироваться в условиях нехватки ресурсов – убежищ, факторов, меняющих возрастную структуру половозрелых особей, и т. п. Если популяция полосатого рака является растущей, увеличивающей свою численность как недавно появившейся в карьере около д. Михневичи, то популяции широкопалого и длиннопалого рака не достигают предельной емкости среды по причине достаточно высокой степени промыслового изъятия и прежде всего вылова раков больших размеров, что снижает величины пополнения, но одновременно увеличивает выживаемость молоди из-за уменьшения внутривидовой конкуренции. Широкопалый рак внесен в Красную книгу страны, его лов запрещен и, как и следовало ожидать, выживаемость половозрелых особей широкопалого рака максимальна в сравниваемом ряду популяций.

Сведения по популяционным характеристикам других видов раков немногочисленны. В работе [26] рассматривается выживаемость и рост *Cambaroides japonicus* (de Naan, 1841) в малом ручье на о. Хоккайдо. Вид редкий, исчезающий. В статье представлены данные по продолжительности жизни, размерной и возрастной структуре популяции *C. japonicus*, в работе [27] имеются сведения по плодовитости вида. Этих данных достаточно, чтобы определить пополнение, длительность генерации, годовое увеличение численности по алгоритму, который используется для оценки демографических показателей популяций раков Беларуси.

Рассчитанные популяционные параметры *C. japonicus* составили: годовое пополнение – 40,11; время генерации – 6,92; годовая скорость роста популяции – 1,7. Рак *C. japonicus* значительно превосходит рассматриваемые виды раков по годовому пополнению и времени генерации. Годовая скорость роста численности *C. japonicus* вполне сравнима с таковой *A. astacus*. Оба вида являются редкими исчезающими и требуют срочных мер охраны, их годовая скорость увеличения численности меньше 2.

Заключение

Оценены динамические характеристики популяций широкопалого *A. astacus*, длиннопалого *P. leptodactylus* и полосатого *F. limosus* раков. Наибольшей скоростью популяционного роста обладает инвазивный чужеродный вид *F. limosus* (3,02 год⁻¹), наименьшей – редкий исчезающий вид *A. astacus* (1,44 год⁻¹). Преимущества быстро распространяющегося инвазивного вида полосатого рака в сравнении с аборигенными видами можно объяснить меньшим временем генерации и высокой скоростью роста численности, которая обеспечивалась высокой плотностью половозрелых особей. Рассматривать высокую плодовитость полосатого рака в сравнении с аборигенными видами (как критерий его конкурентных преимуществ) нет оснований. Основным популяционным показателем, позволяющим прогнозировать результаты межвидовой конкуренции, следует считать годовую скорость увеличения численности.

Библиографические ссылки

1. Aklehnovich A, Razlutskiy V. Distribution and rate of spread of spinycheek crayfish *Orconectes limosus* (Rafinesque, 1817) in Belarus. *BioInvasions Records*. 2013;2(3):221–225.
2. Алехнович АВ, Сливинска К, Молотков ДВ. Потенциальные запасы длиннопалого рака *Astacus leptodactylus* озер и водохранилищ белорусской части бассейна Западного Буга. *Природные ресурсы*. 2018;1:65–71.
3. Алехнович АВ. *Речные раки Беларуси в современных условиях: распространение, динамика численности, продукционно-промысловый потенциал*. Минск: Беларуская навука; 2016. 303 с.
4. Алехнович АВ. Возрастная структура, плодовитость популяции широкопалого рака заброшенных карьеров. *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук*. 2022; 67(1):75–83. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2022-67-1-75-83>.
5. Kossacowski J. Crayfish *Orconectes limosus* in Poland. *Freshwater Crayfish*. 1974;2:31–47.
6. Алимов АФ. *Введение в продукционную гидробиологию*. Ленинград: Гидрометиздат; 1989. 151 с.
7. Kozak P, Buric M, Policar T. The fecundity, time of egg development and juvenile production in spiny-cheek crayfish (*Orconectes limosus*) under controlled conditions. *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*. 2006;380(381):1171–1182.
8. Риклефс Р. *Основы общей экологии*. Москва: Издательство «Мир»; 1979. 424 с.
9. Алехнович АВ. Оценка выживаемости промысловой части популяции длиннопалого рака *Astacus leptodactylus* (Esch.). *Доклады НАН Беларуси*. 2012;5:82–86.
10. Alekhnovich AV. Comparative analysis of reproduction of narrow clawed crayfish *Astacus leptodactylus* Esch. (Crustacea, Decapoda, Astacidae) in its eastern area. *Freshwater Crayfish*. 1997;11:339–347.
11. Алехнович АВ. Плодовитость длиннопалого рака *Pontastacus leptodactylus* в водоемах Беларуси. *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук*. 2023;68(2):147–153. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-2-147-153>.
12. Pilotto F, Free G, Crosa G, Sena F, Ghiani M, Cardoso AC. The Invasive Crayfish *Orconectes Limosus* in Lake Varese: Estimating Abundance and Population Size Structure in the Context of Habitat and Methodological Constraints. *Journal of Crustacean Biology*. 2008;28(4):633–640.
13. Butler MJ, Stein RA. An analysis of the mechanisms governing species replacements in crayfish. *Oecologia*. 1985;66(2):168–177. DOI: 10.1007/BF0037985113.
14. Chadwick DDA, Pritchard EG, Bradley P, Sayer CD, Chadwick MA, Eagle LJB, Axmacher JC. A novel ‘triple drawdown’ method highlights deficiencies in invasive alien crayfish survey and control techniques. *Journal of Applied Ecology*. 2021;58:316–326. DOI: 10.1111/1365-2664.13758.
15. Skurdal J & Taugbøl T. *Astacus*. In: Biology of freshwater Crayfish. Oxford: Blackwell Science Ltd; 2002. p. 467–510.
16. Savolainen R, Westman K, Purstainen M. Fecundity of Finnish noble crayfish *Astacus astacus* L., and signal crayfish, *Pacifastacus leniusculus*, in various natural habitats and in culture. *Freshwater Crayfish*. 1997;11:319–338.
17. Cukerzis J. *Astacus astacus* in Europe. In: Holdich DM & Lowery RS (editors). *Freshwater crayfish: biology, management and exploitation*. New York: Chapman & Haal; 1988. p. 309–340.
18. Meyer KM, Gimpel K & Brandl R. Viability analysis of endangered crayfish populations. *Journal of Zoology*. 2007;273(4):364–371.
19. Westman K, Savolainen R, Purstainen M. Development of European noble crayfish *Astacus astacus* (L.) and American signal crayfish *Pacifastacus leniusculus* (Dana) populations in a small Finnish lake – a 20 year study. *Freshwater Crayfish*. 1995;8:235–248.
20. Klefoth T, Bauschke S, Cetin A, Dührkoop L, Hohnhorst V, Rader V, Riemann P, Bohme J. Winter mortality and growth of juvenile noble crayfish (*Astacus astacus*) under realistic environmental conditions – Implications for conservation management. *Limnologia*. 2023;103:126122. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2023.126122>.
21. Vollestad LA, Dervo BK. Density and yield of the noble crayfish *Astacus astacus* in the River Skotsbergel. *Fauna Norvegica. Seria A*. 1990;11:27–33.
22. Бродский СЯ. *Фауна Украины. Речные раки*. Киев: Наукова думка; 1981. 212 с. Том 2. Выпуск 3.
23. Alekhnovich, A. Characteristics of populations of narrow-clawed crayfish in three Belarusian Lakes of the Baltic Sea catchment area. *Baltic Coastal Zone*. Serie 1. 2022;25:19–30.
24. Kozak P, Buřič M, Policar T, Hamačková J, Lepičova A. The effect of inter- and intra-specific competition on survival and growth rate of native juvenile noble crayfish *Astacus astacus* and alien spiny-cheek crayfish *Orconectes limosus*. *Hydrobiologia*. 2007;590(1):85–94.
25. Hamr P. *Orconectes*. In: Holdich DM, editor. *Biology of Freshwater Crayfish*. London: Blackwell Science Ltd.; 2002. p. 585–608.
26. Kawai T, Hamano T, Matsuura S. Survival and growth of the Japanese crayfish *Cambaroides japonicus* in a small stream. *Hokkaido bulletin of marine science*. 1997;61(1):147–157.
27. Kawai T, Miyake S and T. Hamano T. Individual density and reproduction of *Cambaroides japonicus* (de Haan, 1841) in the southernmost habitat. *Researches on Crustacea*. 1990;19:55–61.

References

1. Aklehnovich A, Razlutskiy V. Distribution and rate of spread of spinycheek crayfish *Orconectes limosus* (Rafinesque, 1817) in Belarus. *BioInvasions Records*. 2013;2(3):221–225.
2. Alekhnovich AV, Slivinska K, Molotkov DV. *Potencialnie zapasy dlinnopalogo raka Astacus leptodactylus ozer i vodochranilish belorusskoi tchasty basseina Zapadnogo Buga* [Potential reserves of narrow-clawed crayfish *Astacus leptodactylus* in lakes and reservoirs of the Belarusian part of the Western Bug basin]. *Natural resources*. 2018;1:65–71. Russian.
3. Alekhnovich AV. *Raki Belarusi v sovremennikh usloviyakh: rasprostraneniya, dinamika populatii, produktia i promisloviy potencial* [Crayfish of Belarus in modern conditions: distribution, population dynamics, production and commercial potential]. Minsk. Belaruskaja navuka; 2016. 303 p. Russian.
4. Alekhnovich AV. *Vozrastnaja struktura, plodovitost populatyi shirokopalogo raka zabroshenogo kar'era* [Age structure, fecundity of the population of noble crayfish of abandoned quarries]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*. 2022; 67(1):75–83. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2022-67-1-75-83>. Russian.

5. Kossacowski J. Crayfish *Orconectes limosus* in Poland. *Freshwater Crayfish*. 1974;2:31–47.
6. Alimov AF. *Vvedeniya v produkcionnuy gidrobiologii* [Introduction to production hydrobiology]. Leningrad: Gidrometizdat; 1989. 151 p. Russian.
7. Kozak P, Buric M, Policar T. The fecundity, time of egg development and juvenile production in spiny-cheek crayfish (*Orconectes limosus*) under controlled conditions. *Bulletin français de la pêche et de la pisciculture*. 2006;380(381):1171–1182.
8. Ricklefs R. *Osnovy ekologii* [Fundamentals of General Ecology]. Moscow: Publishing House «Mir»; 1979. 424 p. Russian.
9. Alekhnovich AV. *Ozenka vizivaemosti promislovai tchasti population Astacus leptodactylus* (Esch.) [Evaluation of survival of the commercial part of the narrow-clawed crayfish population *Astacus leptodactylus* (Esch.)]. *Reports of the National Academy of Sciences*. 2012;5:82–86. Russian.
10. Alekhnovich AV. Comparative analysis of reproduction of narrow clawed crayfish *Astacus leptodactylus* Esch. (Crustacea, Decapoda, Astacidae) in its eastern area. *Freshwater Crayfish*. 1997;11:339–347.
11. Alekhnovich AV. *Plodovitost dlinnopalogo raka Pontastacus leptodactylus v vodoemach Belarusi* [Fecundity of the narrow-clawed crayfish *Pontastacus leptodactylus* in the water bodies of Belarus]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*. 2023;68(2):147–153. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-2-147-153>. Russian.
12. Pilotto F, Free G, Crosa G, Sena F, Ghiani M, Cardoso AC. The Invasive Crayfish *Orconectes Limosus* in Lake Varese: Estimating Abundance and Population Size Structure in the Context of Habitat and Methodological Constraints. *Journal of Crustacean Biology*. 2008;28(4):633–640.
13. Butler MJ, Stein RA. An analysis of the mechanisms governing species replacements in crayfish. *Oecologia*. 1985;66(2):168–177. DOI: 10.1007/BF0037985113.
14. Chadwick DDA, Pritchard EG, Bradley P, Sayer CD, Chadwick MA, Eagle LJB, Axmacher JC. A novel ‘triple drawdown’ method highlights deficiencies in invasive alien crayfish survey and control techniques. *Journal of Applied Ecology*. 2021;58:316–326. DOI: 10.1111/1365-2664.13758.
15. Skurdal J & Taugbøl T. *Astacus*. In: *Biology of freshwater Crayfish*. Oxford: Blackwell Science Ltd; 2002. p. 467–510.
16. Savolainen R, Westman K, Purstainen M. Fecundity of Finnish noble crayfish *Astacus astacus* L., and signal crayfish, *Pacifastacus leniusculus*, in various natural habitats and in culture. *Freshwater Crayfish*. 1997;11:319–338.
17. Cukerzis J. *Astacus astacus* in Europe. In: Holdich DM & Lowery RS (editors). *Freshwater crayfish: biology, management and exploitation*. New York: Chapman & Haal; 1988. p. 309–340.
18. Meyer KM, Gimpel K & Brandl R. Viability analysis of endangered crayfish populations. *Journal of Zoology*. 2007;273(4):364–371.
19. Westman K, Savolainen R, Purstainen M. Development of European noble crayfish *Astacus astacus* (L.) and American signal crayfish *Pacifastacus leniusculus* (Dana) populations in a small Finnish lake – a 20 year study. *Freshwater Crayfish*. 1995;8:235–248.
20. Klefoth T, Bauschke S, Cetin A, Dührkoop L, Hohnhorst V, Rader V, Riemann P, Bohme J. Winter mortality and growth of juvenile noble crayfish (*Astacus astacus*) under realistic environmental conditions – Implications for conservation management Winter mortality and growth of juvenile noble crayfish (*Astacus astacus*) under realistic environmental conditions – Implications for conservation management. *Limnologica*. 2023;103:126122. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2023.126122>.
21. Vollestad LA, Dervo BK. Density and yield of the noble crayfish *Astacus astacus* in the River Skotsbergel. *Fauna Norvegica. Seria A*. 1990;11:27–33.
22. Brodsky SYa. *Vishnie Raki* [Fauna of Ukraine. Crayfish]. Kyiv: Naukova dumka; 1981. 212 p. Volume 26. Issue 3. Ukrainian.
23. Alekhnovich, A. Characteristics of populations of narrow-clawed crayfish in three Belarusian Lakes of the Baltic Sea catchment area. *Baltic Coastal Zone. Serie 1*. 2022;25:19–30.
24. Kozak P, Buřić M, Policar T, Hamačkova J, Lepičova A. The effect of inter- and intra-specific competition on survival and growth rate of native juvenile noble crayfish *Astacus astacus* and alien spiny-cheek crayfish *Orconectes limosus*. *Hydrobiologia*. 2007;590(1):85–94.
25. Hamr P. *Orconectes*. In: Holdich DM, editor. *Biology of Freshwater Crayfish*. London: Blackwell Science Ltd.; 2002. p. 585–608.
26. Kawai T, Hamano T, Matsuura S. Survival and growth of the Japanese crayfish *Cambaroides japonicus* in a small stream. *Hokkaido bulletin of marine science*. 1997;61(1):147–157.
27. Kawai T, Miyake S and T. Hamano T. Individual density and reproduction of *Cambaroides japonicus* (de Haan, 1841) in the southernmost habitat. *Researches on Crustacea*. 1990;19:55–61.

Статья поступила в редакцию 12.03.2025.
Received by editorial board 12.03.2025.

УДК 630.272;581.552;582.6/9

СОСТОЯНИЕ ДЕНДРОФЛОРЫ НЕКОТОРЫХ ПАРКОВ Г. МИНСКА

Н. П. СТРИГЕЛЬСКАЯ¹⁾, И. Э. БУЧЕНКОВ²⁾, А. Г. ЧЕРНЕЦКАЯ¹⁾

¹⁾Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

²⁾Полесский государственный университет,
ул. Днепровской флотилии, 23, 225710, г. Пинск, Беларусь

Экологический потенциал городских ландшафтов определяется видовым составом, структурой растительности, возрастом древостоя, степенью аварийности и жизненным состоянием доминантных видов древесных растений, их устойчивостью к условиям окружающей среды. В связи с этим на первом этапе исследования авторами статьи была определена цель, включающая изучение видового состава, степень аварийности и жизненного состояния кондоминантных видов лиственных древесных растений, произрастающих на территориях ландшафтно-рекреационных зон (городских парков) г. Минска с различной степенью антропогенного прессинга. Исследование аварийности строилось согласно методике проведения мониторинга растительного мира в составе Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь. Для определения жизненного состояния древесных растений использовали шкалу В. С. Николаевского (2002). Результаты исследований включают определение кондоминантных видов древесных растений (14 видов) в крупных ландшафтно-рекреационных зонах г. Минска, характеризующихся разной степенью состояния окружающей среды: Парк Победы, Центральный детский парк им. Максима Горького, Лошицкий усадебно-парковый комплекс и Парк культуры и отдыха им. Челюскинцев. В изучаемых парках выявлено 62 вида древесно-кустарниковых растений, относящихся к 17 семействам; наибольшее количество видов характерно для семейств розоцветные, ивовые, сосновые и кленовые. В работе представлены результаты исследования степени аварийности кондоминантных видов древесных лиственных растений (наиболее аварийными являются *Malus domestica* и *Quercus robur*); дано определение жизненного состояния древесных лиственных растений в парках г. Минска (низкие баллы наблюдаются у *Malus domestica* и *Quercus robur*. На всех изучаемых локациях *Tilia cordata* и *Acer platanoides* имеют значительные повреждения листовой пластинки. В условиях города высокие показатели жизненного состояния наблюдаются у *Populus nigra* на территории Лошицкого усадебно-паркового комплекса и *Betula pubescens* на территории Парка культуры и отдыха им. Челюскинцев, что соответствует относительно благоприятной зоне состояния окружающей среды.

Ключевые слова: дендрофлора; кондоминантные виды; степень аварийности; жизненное состояние; ландшафтно-рекреационные зоны; Парк Победы; Центральный детский парк им. Максима Горького; Лошицкий усадебно-парковый комплекс; Парк культуры и отдыха имени Челюскинцев.

Образец цитирования:

Стригельская Н.П., Бученков И.Э., Чернецкая А.Г. Состояние дендрофлоры некоторых парков г. Минска. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;2:22–30.

<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-22-30>

For citation:

Strigelskaya NP, Buchenkov IE, Chernetskaya AG. State of dendroflora of some parks in the city of Minsk. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;2:22–30. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-22-30>

Авторы:

Надежда Павловна Стригельская – аспирант, факультет экологической медицины.

Игорь Эдуардович Бученков – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; проректор по учебной работе.

Алла Георгиевна Чернецкая – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; заведующий кафедрой общей биологии и генетики.

Authors:

Nadezhda P. Strigelskaya, postgraduate student, faculty of environmental medicine.

nadya.strigelskaya@mail.ru

Igor E. Buchenkov, PhD (agriculture), docent; vice-principal for academic work.

butchenkow@mail.ru

Alla G. Chernetskaya, PhD (agriculture), docent; head of the department of general biology and genetics.

chealval@gmail.com

STATE OF DENDROFLORA OF SOME PARKS IN THE CITY OF MINSK

N. P. STRIGELSKAYA^a, I. E. BUCHENKOV^b, A. G. CHERNETSKAYA^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

^bPolessky State University,

23 Dnieper Flotilla Street, Pinsk 225710, Belarus

Corresponding author: N. P. Strigelskaya (nadya.strigelskaya@mail.ru)

The ecological potential of urban landscapes is determined mainly by the species composition, vegetation structure, stand age, the degree of failure and vital state of dominant species of woody plants, their resistance to environmental conditions. In this regard, at the first stage of the research the authors of the article defined the purpose of the study, which included the study of species composition, the degree of accident rate and vital state of condominant species of deciduous woody plants growing on the territories of landscape and recreational areas (urban parks) of Minsk with different degrees of anthropogenic pressure, other indicators will be studied in the future. Accident rate studies were carried out according to the methodology of flora monitoring as part of the National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus; the scale of V.S. Nikolaevsky (2002) was used to determine the vital state of woody plants. The results of the research include the determination of condominant species of woody plants (14 species) in large landscape and recreational zones of Minsk city belonging to different degrees of environmental conditions: Victory Park, Maksim Gorky Central Children's Park, Loshitsky Manor Park Complex and Chelyuskintsev Park of Culture and Recreation. In the course of the study, 62 species of woody and shrubby plants belonging to 7 families were identified in the studied parks; the largest number of species is characteristic of the families Rosaceae, Willow, Pine and Maple. The article presents: the results of the study of the degree of accident rate of condominant species of deciduous woody plants (the most accidental are *Malus domestica* and *Quercus robur*); determination of the vital state of deciduous woody plants in the parks of Minsk (low scores are observed in *Malus domestica* and *Quercus robur*. At all investigated locations *Tilia cordata* and *Acer platanoides* have significant damage to the leaf laminae. Under urban conditions, high indicators of vital state are observed in *Populus nigra* on the territory of the Loshitsky estate-park complex and *Betula pubescens* on the territory of the Chelyuskintsev Park of Culture and Recreation, which corresponds to a relatively favorable zone of environmental conditions.

Keywords: dendroflora; condominant species; degree of accident; life state; landscape-recreational zones; Victory Park; Maksim Gorky Central Children's Park; Loshitsky Manor Park Complex; Chelyuskintsev Park of Culture and Recreation.

Введение

В современных урболодшафтах важную роль играет сохранение озелененных территорий, так как зеленые насаждения влияют на температуру и влажность, способны регулировать аэрацию и шумовой режим территорий, обладают фитонцидными свойствами, а также оказывают оздоравливающий эффект, являясь в то же время незаменимой композиционной составляющей городского ландшафта [1].

Экологический потенциал городских ландшафтов во многом детерминирован структурой растительности, ее видовым составом, полнотой, возрастом древостоев, состоянием и устойчивостью их к факторам городской среды.

Состояние дендрофлоры в парках Минска также служит важным индикатором экологического потенциала городского ландшафта. Это связано с тем, что состав и жизненное состояние видов растений на этих территориях отражают экологические условия и изменения в городе в связи с рекреационной нагрузкой, влиянием транспортных магистралей и промышленных предприятий. Данная информация необходима для мониторинга и управления экологическими последствиями урбанизации.

Цель исследования – изучение видового состава древесно-кустарниковой растительности, степени аварийности и жизненного состояния кондоминантных видов лиственных древесных растений, произрастающих на территориях ландшафтно-рекреационных зон (городских парков) г. Минска с различной степенью благоприятности состояния окружающей среды.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования были выбраны четыре крупные ландшафтно-рекреационные зоны г. Минска, характеризующиеся разной степенью состояния окружающей среды [2]: Парк Победы, Центральный детский парк им. Максима Горького, Лошицкий усадебно-парковый комплекс и Парк культуры и отдыха им. Челюскинцев.

Парк Победы располагается в Центральном районе г. Минска в непосредственной близости от водохранилища Комсомольское озеро (общая площадь – 200 га).

Центральный детский парк им. Максима Горького находится между улицами Янки Купалы, Фрунзе, Первомайской и проспектом Независимости, недалеко от Площади Победы (общая площадь на сегодняшний день – 28 га).

Лошицкий усадебно-парковый комплекс расположен на территории Ленинского р-на г. Минска, между микрорайонами Лошица и Серебрянка, площадь занимаемой территории – 102,3 га.

Парк культуры и отдыха им. Челюскинцев располагается на территории Первомайского р-на. Он примыкает к территории Центрального ботанического сада Национальной академии наук Беларуси (площадь – 59 га).

Оценка современного состояния окружающей среды г. Минска составлена на основе графических материалов приложения Генерального плана города. В данном приложении учитывались степень загрязнения воздуха в целом и загрязнение воздушного бассейна города автомобильным транспортом в частности, а также определение состояния окружающей среды по ландшафтно-экологическим районам г. Минска [2].

В соответствии с данной схемой исследуемые территории относятся к следующим зонам благоприятности:

– Парк Победы – относительно неблагоприятная зона, которая находится в окружении крупных транспортных магистралей: пр. Машерова на юге, Старовиленского тракта на востоке, ул. Орловской на севере и пр. Победителей на западе.

– Центральный детский парк им. Максима Горького – относительно неблагоприятная зона – крупная транспортная магистраль пр. Независимости на северо-западе.

– Лошицкий усадебно-парковый комплекс – относительно благоприятная зона – транспортная магистраль ул. Маяковского, ОАО «Камволь», Минский хладокомбинат № 2 на западе.

– Парк культуры и отдыха им. Челюскинцев – относительно благоприятная зона – крупная транспортная магистраль пр. Независимости на севере.

Определение видового разнообразия проводили маршрутным методом с использованием определителя высших растений Беларуси [3]. Маршрутный метод включал определение древесно-кустарниковых видов при прохождении всей дорожно-тропиночной сети в исследуемых ландшафтно-рекреационных зонах.

Таким образом, для изучения методом закладки пробных площадок проводилось исследование по определению кондоминантных видов лиственных древесных растений. Кондоминантными являются виды растений, содоминирующие в фитоценозах, которые участвуют в сложении главного слоя в количестве двух и более видов [4].

Исследования аварийности и жизненного состояния кондоминантных видов лиственных древесных растений проводили методом закладки пробных площадок. Для получения достоверной картины на территории парков формировали по 5 точек учета (ТУ), расположенных на некотором расстоянии друг от друга в разных частях. На каждой ТУ определялось 10 живых деревьев одного вида: центральное дерево и 9 ближайших к нему [5].

Для определения степени аварийности отдельных деревьев использовали шкалу (табл. 1) по методике проведения мониторинга растительного мира в составе Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь [5].

Таблица 1

Шкала оценки степени аварийности

Table 1

Accident rate rating scale

Балл	Характеристика
3	Аварийно опасные деревья
2	Потенциально опасные деревья
1	Малоопасные деревья
0	Дерево не представляет опасности в не экстремальных условиях

В настоящее время существует ряд оценочных шкал, отражающих жизненное состояние деревьев в насаждениях города. Нами была использована шкала В. С. Николаевского (2002), по которой жизненное состояние древесных растений определяли визуально по степени повреждения ассимиляционного аппарата и крон растений. С использованием десятибалльной шкалы оценивались следующие параметры: количество живых ветвей в кронах деревьев (P_1); степень облиственности крон (P_2); количество живых (без

некроза) листьев в кронах (P_3); средняя величина площади живых листьев (P_4). Суммарная оценка жизненного состояния деревьев каждого вида (ЖС) – максимум 40 баллов [6–8].

Результаты исследования и их обсуждение

В результате определения видового состава в изучаемых парковых зонах г. Минска было выявлено 62 вида древесно-кустарниковых растений, относящихся к 17 семействам (табл. 2). Наибольшее количество видов характерно для семейств розоцветные (15 видов), ивовые (13), сосновые (9) и кленовые (6).

Таблица 2

Видовой состав древесно-кустарниковых растений, произрастающих на территориях ландшафтно-рекреационных зон (городских парков) г. Минска с различной степенью состояния окружающей среды

Table 2

Species composition of woody and shrubby plants growing in the territories of landscape and recreational zones (city parks) of Minsk with varying degrees of environmental conditions

Вид растения	Парк Победы	Центральный детский парк им. Максима Горького	Лошицкий усадебно-парковый комплекс	Парк культуры и отдыха им. Челюскинцев
1	2	3	4	5
Семейство Ивовые (<i>Salicaceae</i>)				
Ива белая (<i>Salix alba</i> L.)	+	+	+	+
Ива козья (<i>S. caprea</i> L.)	+	+	+	+
Ива корзиночная (<i>S. viminalis</i> L.)	+		+	
Ива ломкая (<i>S. fragilis</i> L.)	+	+	+	+
Ива остролистная (<i>S. acutifolia</i> Willd.)	+	+	+	
Ива пятитычинковая (<i>S. pentandra</i> L.)	+		+	
Ива трехтычинковая (<i>S. triandra</i> L.)	+		+	
Ива Шверина (<i>S. schwerinii</i> E. Wolf)			+	
Ива шерстистопобеговая (<i>S. dasyclados</i> Wimm.)			+	
Тополь бальзамический (<i>Populus balsamifera</i> L.)		+	+	+
Тополь белый (<i>P. alba</i> L.)	+	+	+	+
Тополь дрожащий (<i>P. tremula</i> L.)	+	+	+	
Тополь черный (<i>P. nigra</i> L.)	+	+	+	+
Семейство Березовые (<i>Betulaceae</i>)				
Береза повислая (<i>Betula pendula</i> Roth.)	+	+	+	+
Береза пушистая (<i>B. pubescens</i> Ehrh.)	+	+	+	+
Граб обыкновенный (<i>Carpinus betulus</i> L.)			+	+
Ольха клейкая (<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.)	+	+		
Ольха серая (<i>A. incana</i> (L.) Moench.)	+	+	+	
Семейство Розоцветные (<i>Rosaceae</i>)				
Арония Мичурина (<i>Aronia mitschurinii</i> A. K. Skvortsov & Maitul.)				+
Боярышник кроваво-красный (<i>Crataegus sanguinea</i> Pall.)			+	
Боярышник однопестичный (<i>Cr. monogyna</i> Jacq.)	+	+	+	+
Боярышник полумягкий (<i>Cr. submollis</i> Sarg.)			+	+
Вишня войлочная (<i>Cerasus tomentosa</i> (Thunb.) Wall.)	+	+		
Вишня обыкновенная (<i>C. vulgaris</i> Mill.)	+	+	+	+
Вишня птичья (<i>C. avium</i> (L.) Moench)	+		+	+
Груша обыкновенная (<i>Pyrus commanis</i> L.)	+	+	+	+
Рябина обыкновенная (<i>Sorbus aucuparia</i> L.)	+	+	+	+
Слива домашняя (<i>Prunus domestica</i> L.)			+	
Слива растопыренная (<i>P. cerasifera</i> Ehrh.)				

Окончание табл. 1

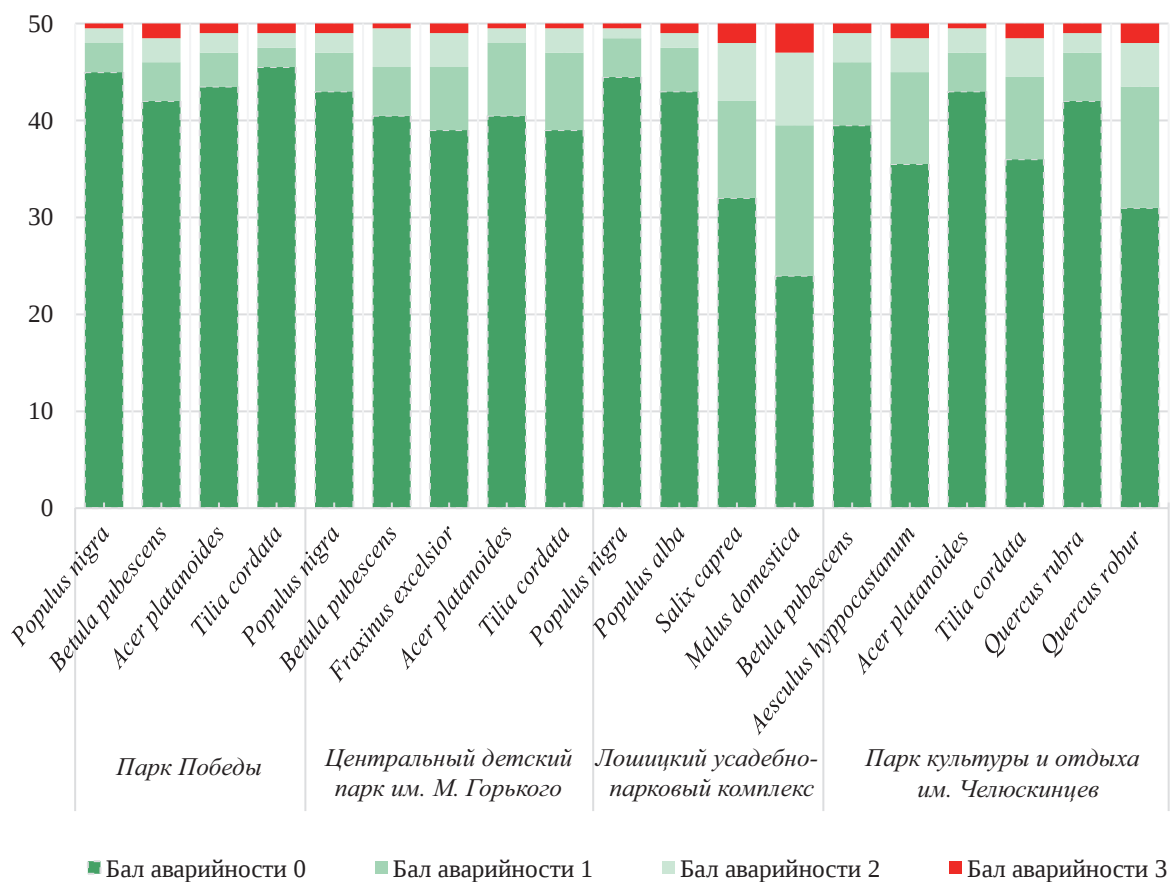
Ending table 1

1	2	3	4	5
Черемуха Маака (<i>Padus maackii</i> (Rupr.) Kom.)		+	+	
Черемуха обыкновенная (<i>P. avium</i> Mill.)		+	+	+
Яблоня домашняя (<i>Malus domestica</i> Borch.)	+	+	+	+
Яблоня лесная (<i>M. sylvestris</i> Mill.)	+	+	+	+
Семейство Конско-каштановые (<i>Hippocastanaceae</i>)				
Конский каштан обыкновенный (<i>Aesculus hippocastanum</i> L.)	+	+	+	+
Семейство Ореховые (<i>Juglandaceae</i>)				
Орех маньчжурский (<i>Juglans mandshurica</i> Maxim.)	+	+	+	+
Семейство Сосновые (<i>Pinaceae</i>)				
Ель европейская (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.)		+	+	+
Ель канадская (<i>P. glauca</i> (Moench) Voss)			+	
Ель колючая (<i>P. pungens</i> Engelm)	+	+	+	+
Лжетсуга Мензиса (<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco)			+	+
Лиственница европейская (<i>Larix decidua</i> Mill.)			+	
Лиственница сибирская (<i>L. sibirica</i> Ledeb.)		+	+	+
Сосна Веймутова (<i>Pinus strobus</i> L.)	+		+	+
Сосна обыкновенная (<i>P. sylvestris</i> L.)	+	+	+	+
Сосна черная (<i>P. nigra</i> J. F. Arnold)			+	
Семейство Кипарисовые (<i>Cupressaceae</i>)				
Туя западная (<i>Thuja occidentalis</i> L.)	+	+	+	+
Семейство Маслинные (<i>Oleaceae</i>)				
Ясень обыкновенный (<i>Fraxinus excelsior</i> L.)	+	+	+	+
Семейство Кленовые (<i>Aceraceae</i>)				
Клен ложноплатановый (<i>Acer pseudoplatanus</i> L.)	+	+	+	+
Клен остролистный (<i>A. platanoides</i> L.)	+	+	+	+
Клен полевой (<i>A. campestre</i> L.)				+
Клен сахаристый (<i>A. saccharinum</i> L.)	+	+	+	+
Клен татарский (<i>A. tataricum</i> L.)	+			
Клен ясенелистный (<i>A. negundo</i> L.)	+	+	+	+
Семейство Липовые (<i>Tiliaceae</i>)				
Липа крупнолистная (<i>Tilia platyphyllos</i> Scop.)	+	+	+	+
Липа мелколистная (<i>T. cordata</i> Mill.)	+	+	+	+
Семейство Ильмовые (<i>Ulmaceae</i>)				
Вяз шершавый (<i>Ulmus glabra</i> Huds.)	+	+	+	+
Семейство Бобовые (<i>Fabaceae</i>)				
Карагана древовидная (<i>Caragana arborescens</i> Lam.)			+	+
Семейство Калиновые (<i>Viburnaceae</i>)				
Калина красная (<i>Viburnum opulus</i> L.)			+	+
Семейство Буковые (<i>Fagaceae</i>)				
Дуб красный (<i>Quercus rubra</i> L.)	+	+	+	+
Дуб черешчатый (<i>Q. robur</i> L.)	+		+	+
Семейство Бузиновые (<i>Sambucacaceae</i>)				
Бузина черная (<i>Sambucus nigra</i> L.)			+	+
Семейство Лоховые (<i>Elaeagnaceae</i>)				
Лох серебристый (<i>Elaeagnus commutata</i> Bernh.)			+	+
Семейство Рутые (<i>Rutaceae</i>)				
Бархат амурский (<i>Phellodendron amurense</i> Rupr.)				+

Следует отметить, что в озеленении изученных территорий города основными кондоминирующими породами являются тополь черный (*Populus nigra*), тополь белый (*P. alba*), ива козья (*Salix caprea*), яблоня домашняя (*Malus domestica*), береза пушистая (*Betula pubescens*), конский каштан обыкновенный (*Aesculus hippocastanum*), ель колючая (*Picea pungens*), ель европейская (*P. abies*), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*), клен остролистный (*Acer platanoides*), липа мелколистная (*Tilia cordata*), дуб черешчатый (*Quercus robur*), дуб красный (*Q. rubra*).

Повсеместно встречаются такие интродуцированные виды, как конский каштан обыкновенный (*Aesculus hippocastanum*), орех маньчжурский (*Juglans mandshurica*), лиственница сибирская (*Larix sibirica*), туя западная (*Thuja occidentalis*), клен ясенелистный (*Acer negundo*), дуб красный (*Quercus rubra*). В Парке культуры и отдыха им. Челюскинцев интродуцированные виды (*Quercus rubra* и *Aesculus hippocastanum*) являются кондоминантными, остальные кондоминантные виды на территории исследуемых парков являются аборигенными.

Важным элементом в оценке древесных растений ландшафтно-рекреационных зон является определение степени их аварийности [5]. Полученные данные представлены на рисунке.



Количество деревьев, характеризующихся различными балами аварийности
в парках г. Минска, штук

Number of trees, characterized by different accident rates in parks of Minsk city, pcs

В результате проведенных исследований установлено, что из кондоминантных видов лиственных древесных растений, не представляющих опасности по степени аварийности, являются *Populus nigra* и *Acer platanoides* на территории всех исследуемых парков. Наиболее аварийными являются *Malus domestica* на территории Лошицкого усадебно-паркового комплекса и *Quercus robur* на территории Парка культуры и отдыха им. Челюскинцев.

Одним из показателей, который отражает степень устойчивости растений к экстремальным условиям городской среды в ходе роста и развития, выступает жизненное состояние. Под жизненным состоянием растений понимается совокупность морфоструктурных и ростовых особенностей, эффективность использования ресурсов местообитания, а также способность противостоять стрессовым воздействиям. Оценка жизненного состояния древесных растений, используемых в городском озеленении, дает возможность

обосновать рекомендации для создания наиболее продуктивных и долговечных городских зеленых насаждений [9].

Полученные данные о жизненном состоянии кондоминантных видов лиственных древесных растений, произрастающих на территориях ландшафтно-рекреационных зон (городских парков) г. Минска с различной степенью состояния окружающей среды, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Жизненное состояние древесных растений

Table 3

Life status of woody plants

Район исследования	Вид растения	P ₁ , баллы	P ₂ , баллы	P ₃ , баллы	P ₄ , баллы	ЖС, сумма баллов
Парк Победы	<i>Populus nigra</i>	9,4 ± 0,5	8,7 ± 0,5	9,0 ± 0,6	9,1 ± 0,4	36,2 ± 2,0
	<i>Betula pubescens</i>	9,1 ± 0,7	8,9 ± 0,8	9,0 ± 0,7	8,8 ± 1,0	35,8 ± 3,2
	<i>Acer platanoides</i>	9,1 ± 0,4	8,9 ± 0,8	7,4 ± 0,9	8,2 ± 0,6	33,6 ± 2,7
	<i>Tilia cordata</i>	9,0 ± 0,7	8,6 ± 0,4	7,7 ± 1,0	8,1 ± 1,2	33,5 ± 2,7
Центральный детский парк им. Максима Горького	<i>Betula pubescens</i>	9,6 ± 0,1	9,2 ± 0,2	9,1 ± 0,5	9,0 ± 0,7	36,9 ± 1,5
	<i>Fraxinus excelsior</i>	9,3 ± 0,2	9,4 ± 0,5	9,0 ± 0,6	8,9 ± 0,7	36,8 ± 1,7
	<i>Populus nigra</i>	9,2 ± 0,6	9,0 ± 0,5	9,3 ± 0,4	9,1 ± 0,8	36,6 ± 2,0
	<i>Acer platanoides</i>	9,7 ± 0,1	8,7 ± 0,6	7,8 ± 0,8	7,9 ± 0,5	34,1 ± 2,0
	<i>Tilia cordata</i>	9,4 ± 0,3	8,5 ± 0,8	6,4 ± 0,5	8,2 ± 0,4	32,5 ± 3,0
Лошицкий усадебно-парковый комплекс	<i>Populus nigra</i>	9,4 ± 0,2	9,5 ± 0,3	9,3 ± 0,7	9,2 ± 0,3	37,4 ± 1,5
	<i>Populus alba</i>	9,0 ± 0,7	9,2 ± 0,4	8,9 ± 0,7	9,3 ± 0,6	36,4 ± 2,4
	<i>Salix caprea</i>	8,9 ± 0,6	9,0 ± 0,6	8,7 ± 0,4	9,2 ± 0,7	35,8 ± 2,7
	<i>Malus domestica</i>	6,3 ± 0,8	7,9 ± 0,7	7,6 ± 0,9	8,4 ± 0,5	30,2 ± 2,9
Парк культуры и отдыха им. Челюскинцев	<i>Betula pubescens</i>	9,5 ± 0,4	9,3 ± 0,6	9,4 ± 0,3	9,0 ± 0,7	37,2 ± 2,0
	<i>Quercus rubra</i>	8,7 ± 0,8	8,8 ± 0,8	8,8 ± 1,0	9,0 ± 0,3	35,3 ± 3,9
	<i>Acer platanoides</i>	9,4 ± 0,2	8,7 ± 0,8	7,0 ± 1,7	8,0 ± 1,6	33,1 ± 4,3
	<i>Aesculus hippocastanum</i>	8,6 ± 1,1	7,4 ± 1,5	8,6 ± 0,9	8,4 ± 0,6	33,1 ± 4,1
	<i>Tilia cordata</i>	8,2 ± 1,5	7,6 ± 1,1	8,2 ± 1,4	8,5 ± 0,7	32,5 ± 4,7
	<i>Quercus robur</i>	6,8 ± 0,4	7,6 ± 1,2	8,7 ± 0,7	7,9 ± 1,5	31,0 ± 3,8

Таким образом, низкие баллы жизненного состояния в исследованных парках г. Минска наблюдаются у *Malus domestica* (30,2 ± 2,9) и *Quercus robur* (31,0 ± 3,8), а также у *Tilia cordata* (32,5 ± 4,7) и *Acer platanoides* (33,1 ± 4,3).

Следует отметить, что *Malus domestica* является кондоминантным видом только для Лошицкого усадебно-паркового комплекса, так как данный парк образован на месте бывшего Белорусского филиала Всесоюзного института растениеводства.

На всех исследуемых локациях *Tilia cordata* и *Acer platanoides* имеют значительные повреждения листовой пластинки фитозаболеваниями и вредителями филофагами (степень повреждения около 50 %). В условиях города высокие показатели жизненного состояния наблюдаются у *Populus nigra* (37,4 ± 1,5) на территории Лошицкого усадебно-паркового комплекса и *Betula pubescens* (37,2 ± 2,0) на территории Парка культуры и отдыха им. Челюскинцев, что соответствует относительно благоприятной зоне состояния окружающей среды.

Заключение

На основании результатов изучения видового состава дендрофлоры, степени аварийности и жизненного состояния кондоминантных видов лиственных древесных растений, произрастающих на территориях ландшафтно-рекреационных зон (городских парков) г. Минска с различной степенью состояния окружающей среды, можно сделать следующие выводы:

1. В изучаемых парках г. Минска было определено 62 вида древесно-кустарниковых растений, относящихся к 17 семействам. Наибольшее количество видов характерно для семейств розоцветные (15 видов), ивовые (13), сосновые (9) и кленовые (6); основные кондоминирующие породы: *Populus nigra*, *P. alba*, *Salix caprea*, *Malus domestica*, *Betula pubescens*, *Aesculus hippocastanum*, *Picea pungens*, *P. abies*, *Pinus sylvestris*, *Fraxinus excelsior*, *Acer platanoides*, *Tilia cordata*, *Quercus robur*, *Quercus rubra*.

2. Установлено, что из кондоминантных видов лиственных древесных растений, не представляющих опасности по степени аварийности, являются *Populus nigra* и *Acer platanoides* на территории всех исследуемых парков; наиболее аварийными – *Malus domestica* на территории Лошицкого усадебно-паркового комплекса и *Quercus robur* на территории Парка культуры и отдыха им. Челюскинцев.

3. Низкие баллы жизненного состояния в исследованных парках г. Минска наблюдаются у *Malus domestica* ($30,2 \pm 2,9$) и *Quercus robur* ($31,0 \pm 3,8$), а также у *Tilia cordata* ($32,5 \pm 4,7$) и *Acer platanoides* ($33,1 \pm 4,3$). В условиях города высокие показатели жизненного состояния наблюдаются у *Populus nigra* ($37,4 \pm 1,5$) на территории Лошицкого усадебно-паркового комплекса и *Betula pubescens* ($37,2 \pm 2,0$) на территории Парка культуры и отдыха им. Челюскинцев, что соответствует относительно благоприятной зоне состояния окружающей среды.

В городских парках необходимо использовать паркообразующие виды, составляющие фитоценотическую структуру садово-паркового ландшафта с учетом устойчивости к воздействию городской среды (загазованности и запыленности воздуха, уплотнению и засолению почвы) и климатическим особенностям. Хорошо зарекомендовавшими себя из лиственных древесно-кустарниковых пород считаются: основной ассортимент – *Tilia cordata* и *T. platyphyllos*, *Acer platanoides*, *Populus nigra* и *P. alba*, *Fraxinus excelsior*, *Betula pubescens* и *B. pendula*; дополнительный ассортимент – *Ulmus glabra*, *Carpinus betulus*, *Salix alba* и *S. caprea*, *Quercus rubra*, *Padus avium* и *P. aackii*, *Cerasus tomentosa* и *C. avium*, *Populus tremula*, *Pyrus commaniscommunis*, *Acer saccharinum* и *A. tataricum*, *Caragana arborescens*, *Elaeagnus commutata*, *Aronia mitschurinii*.

Использование предлагаемых растений на городских объектах (основного и дополнительного ассортимента) позволяет обеспечить декоративный эффект в течение всего сезона. Однако поскольку они произрастают на объектах, подверженных антропогенному воздействию среды города, то требуют повышенного внимания при содержании.

Библиографические ссылки

1. Нитиевская ЕЕ, Протасова ЮА. Эволюция городского ландшафта: природа в городе. В: *Город, пригодный для жизни: Материалы V Международной научно-практической конференции*. Красноярск: Сибирский федеральный университет; 2023. с. 229–233.
2. Коллонтай АН, редактор. *Генеральный план города Минска с прилегающими территориями в пределах перспективной городской черты*. Минск: УП «Новик»; 2004. 137 с.
3. Парфенов ВИ, редактор. *Определитель высших растений Беларуси*. Минск: Дизайн-ПРО; 1999. 471 с.
4. Быков БА, *Геоботанический словарь*. Алма-Ата: «Наука» КазССР; 1973. 216 с.
5. Пугачевский АВ, редактор. *Методика проведения мониторинга растительного мира в составе Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь*. Минск: Право и экономика; 2011. 165 с.
6. Николаевский ВС. *Экологическая оценка загрязнения среды и состояние наземных экосистем методами фитоиндикации*. Пушкино: ВНИИЛМ; 2002. 220 с.
7. Медведева ЕЮ. *Биолого-экологические особенности роста и размножения гибридных тополей в городе Екатеринбурге*. Екатеринбург: [б. и.]; 2015. 20 с.
8. Бухарина ИЛ, Поварничина ТМ, Ведерников ТМ. *Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде*. Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА; 2007. 216 с.
9. Прохоренко НБ, Демина ГВ, Мингазова ДН. Оценка жизненного состояния деревьев в урбанизированных условиях Казани. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2017;9(2–3):507–512.

References

1. Nitiievskaja EE, Protasova JuA. *Evoljutsiya gorodskogo landshafta: priroda v gorode* [Evolution of urban landscape: nature in the city]. In: *Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2023. p. 229–233. Russian.

2. Kollontaj AN, editor. *General'nyj plan goroda Minska s prilegajushhimi territorijami v predelah perspektivnoj gorodskoj cherty* [General Plan of the City of Minsk with adjacent territories within the perspective of the city limits]. Minsk: UP «Novik»; 2004. 137 p. Russian.
3. Parfenov VI, editor. *Opredelitel' vysshih rastenij Belarusi* [Determinator of higher plants of Belarus]. Minsk: Dizayn-PRO; 1999. 471 p. Russian.
4. Bykov BA, *Geobotanicheskij slovar'* [Geobotanical Dictionary]. Alma-Ata: «Science» of the KazSSR; 1973. 216 p. Russian.
5. Pugachevsky AV, editor. *Metodika provedenija monitoringa rastitel'nogo mira v sostave Nacional'noj sistemy monitoringa okruzhajushhej sredy Respubliki Belarus'* [Methodology of monitoring of flora as part of the National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus]. Minsk: Law and Economics; 2011. 165 p. Russian.
6. Nikolaevsky VS. *Ekologicheskaya ocenka zagryaznenija sredy i sostojanie nazemnyh jekosistem metodami fitoindikacii* [Ecological assessment of environmental pollution and the state of terrestrial ecosystems by methods of phytoindication]. Pushkino: VNIILM; 2002. 220 p. Russian.
7. Medvedeva EJu. *Biologo-ekologicheskie osobennosti rosta i razmnozheniya gibridnykh topolei v gorode Ekaterinburge* [Biological and ecological features of growth and reproduction of hybrid poplars in the city of Yekaterinburg]. Yekaterinburg: [publisher unknown]; 2015. 20 p. Russian.
8. Bukharina IL, Povarnitsina TM, Vederkov TM. *Jekologo-biologicheskie osobennosti drevesnyh rastenij v urbanizirovannoj srede* [Ecological and biological features of woody plants in urbanized environment]. Izhevsk: FGOU VPO Izhevsk State Agricultural Academy; 2007. 216 p. Russian.
9. Prokhorenko NB, Demina GV, Mingazova DN. *Ocenka zhiznennogo sostojanija derev'ev v urbanizirovannyh uslovijah Kazani* [Assessment of the vital state of trees in urbanized conditions of Kazan]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoy Akademii nauk*. 2017;9(2–3):507–512. Russian.

Статья поступила в редакцию 14.01.2025.
Received by editorial board 14.01.2025.

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 546.58:577.1

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ^{137}Cs МЕЖДУ ТВЕРДОЙ И ЖИДКОЙ ФАЗАМИ НА ЭТАПЕ ОТДАЛЕННЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

А. Н. НИКИТИН^{1),2)}, С. А. ТАГАЙ³⁾, Е. В. МИЩЕНКО¹⁾, Г. А. ЛЕФЕРД¹⁾

¹⁾Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси,
ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Беларусь

²⁾Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академика Купревича, 2, 220141, Минск, Беларусь

³⁾Полесский государственный радиационно-экологический заповедник,
ул. Терешковой, 7, 247618, Хойники, Беларусь

Распределение радиоактивных изотопов цезия между сорбированным на твердой фазе почвы состоянием и почвенным раствором определяет их доступность для корневого поглощения растениями. На это распределение влияют количественные и качественные показатели глинистой фракции, органическое вещество почвы, кислотность и концентрация ионов в почвенном растворе. Роль влагонасыщенности почвы в этом распределении практически не изучена.

Образец цитирования:

Никитин АН, Тагай СА, Мищенко ЕВ, Леферд ГА. Влияние влажности почвы на распределение ^{137}Cs между твердой и жидкой фазами на этапе отдаленных последствий загрязнения. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;2:31–39.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-31-39>

For citation:

Nikitin AN, Tagai SA, Mishchenko EV, Leferd GA. Influence of soil moisture on the distribution of ^{137}Cs between the solid and liquid phases at the late stage of contamination consequences. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;2:31–39. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-31-39>

Авторы:

Александр Николаевич Никитин – кандидат сельскохозяйственных наук; заместитель директора по научной работе.

Светлана Алексеевна Тагай – научный сотрудник.

Егор Викторович Мищенко – заведующий лабораторией радиоэкологии.

Галина Аркадьевна Леферд – научный сотрудник.

Authors:

Aleksander N. Nikitin, PhD (agriculture); deputy director for sciences.

nikitinale@gmail.com

Svetlana A. Tagai, researcher.

lanabuz@tut.by

Yahor V. Mishchanka, head of the laboratory of radioecology.

egormischenko@gmail.com

Galina A. Leferd, researcher.

leferd@mail.ru

В исследовании представлены результаты экспериментального анализа влияния влажности почвы в изменении подвижности и биологической доступности радионуклида ^{137}Cs в аллювиальных почвах.

Цель работы – оценка того, как изменения влажности почвы влияют на объемную активность ^{137}Cs в почвенном растворе и скорость его диффузии, что оказывает влияние на его биологическую доступность. Модельные эксперименты были поставлены с дерново-глеевой супесчаной и дерново-глеевой песчаной аллювиальными почвами. Анализ полученных результатов свидетельствует, что минимальные значения коэффициента распределения ^{137}Cs между твердой фазой и почвенным раствором наблюдаются при влажности 70 % от полной влагоемкости в дерново-глеевой супесчаной почве и при 100 % в дерново-глеевой песчаной почве. Изменения данного показателя, напрямую влияющего на биологическую доступность радионуклида, могут достигать десяти и более раз в зависимости от влажности почвы. В работе установлено, что скорость диффузии ^{137}Cs в аллювиальной почве достигает максимума при влажности 70–85 % от полной влагоемкости. При полном влагонасыщении почвы скорость диффузии несколько снижается, а при уменьшении влажности до 40 % падает в два раза. Эти результаты демонстрируют сложную зависимость между влажностью почвы и подвижностью радионуклида, что имеет важное значение для понимания его поведения в системе «почва – растение» в различных условиях. Результаты исследования могут быть использованы для улучшения моделей прогноза поведения радионуклидов цезия в системе «почва – растение» и оптимизации методов радиационной защиты в сельском хозяйстве.

Ключевые слова: радиоактивные изотопы цезия; влажность почвы; подвижность радионуклидов; биологическая доступность; коэффициент распределения; аллювиальные почвы.

Благодарность. Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» подпрограмма 3 «Радиация и биологические системы» на 2021–2025 годы, задание 3.04 «Динамика структурно-функционального состояния наземных и водных экосистем в условиях изменения климата и техногенного воздействия».

INFLUENCE OF SOIL MOISTURE ON THE DISTRIBUTION OF ^{137}Cs BETWEEN THE SOLID AND LIQUID PHASES AT THE LATE STAGE OF CONTAMINATION CONSEQUENCES

A. N. NIKITIN^{a, b}, S. A. TAGAI^c, E. V. MISHCHENKO^a, G. A. LEFERD^a

^a*Institute of Radiobiology, National Academy of Sciences of Belarus,
4 Fedjuninskaga Street, Gomel 246007, Belarus*

^b*Institute of Microbiology, National Academy of Sciences of Belarus,
2 Academic Kuprevich Street, Minsk 220141, Belarus*

^c*Polesie State Radiation-Ecological Reserve,
7 Tserashkovaj Street, Hoiniki 247618, Belarus*

Corresponding author: A. N. Nikitin (nikitinale@gmail.com)

The partitioning of radioactive cesium isotopes between solids and liquid phases in soil dictates their availability for plant root uptake. This distribution is influenced by the quantity and mineral composition of the clay fraction, soil organic matter content, acidity levels, and ion concentrations in the soil solution. However, the role of soil moisture content in this partitioning remains largely unexplored. This study presents experimental findings on how soil moisture affects the mobility and bioavailability of the radionuclide ^{137}Cs in alluvial soils. The objective was to assess how variations in soil moisture influence the concentration of ^{137}Cs in the soil solution and its diffusion rate, which in turn impact its bioavailability. Model experiments were conducted using sod-gleyed sandy loam and sod-gley sandy alluvial soils. Analysis revealed that the minimum values of distribution coefficients of ^{137}Cs between the solid phase and soil solution occurred at 70 % of full moisture capacity in sod-gleyed sandy loam soil and at 100% in sod-gley sandy soil. Changes in this coefficient, which directly affect the radionuclide's bioavailability, can vary ten times or more depending on soil moisture. The study established that the diffusion rate of ^{137}Cs in alluvial soil peaks at moisture levels between 70 and 85 % of full moisture capacity. At full saturation, the diffusion rate slightly decreases, and it declines by half when moisture is reduced to 40 %. These findings demonstrate a complex relationship between soil moisture and radionuclide mobility, which is crucial for understanding ^{137}Cs behavior in the soil-plant system under varying conditions. The results can be utilized to enhance predictive models of cesium radionuclide behavior in the soil-plant system and to optimize radiation protection methods in agriculture.

Keywords: radioactive cesium; soil moisture; radionuclide mobility; bioavailability; distribution coefficient; alluvial soils.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the State Scientific Research Program «Natural Resources and the Environment», Subprogram 3 «Radiation and Biological Systems» for 2021–2025, Task 3.04 «Dynamics of the Structural and Functional State of Terrestrial and Aquatic Ecosystems under Climate Change and Technogenic Impact».

Введение

Особенности поведения радиоактивных изотопов Cs (^{134}Cs , ^{135}Cs , ^{137}Cs) в системе «почва – растение» в значительной мере определяют тяжесть последствий радиационных аварий с выбросом продуктов деления U и Pu в окружающую среду. Так как корневое потребление изотопов Cs происходит из почвенного раствора, то их перераспределение между растворенным состоянием и другими формами нахождения оказывает сильное влияние на загрязнение растений [1]. Количественный анализ факторов, способных сместить динамическое равновесие в системе «растворенный Cs – сорбированный Cs», важен для разработки прогнозных моделей накопления радиоактивных изотопов растениями и эффективного применения мер радиационной защиты в сельском хозяйстве.

Являясь щелочным металлом, Cs обладает хорошей растворимостью в воде. Однако в почвенной среде он подвергается сорбции в катионообменном комплексе, в местах высокоспецифической сорбции на расширенных краевых поверхностях глинистых минералов со структурой 2:1, а также на клеточных стенках и внутри микроорганизмов почвы [2]. Кроме того, с течением времени происходит проникновение Cs глубоко в межпакетные пространства глинистых минералов, преимущественно из группы смектита, где он прочно фиксируется [3]. В связи с этим доля находящихся в почвенном растворе изотопов Cs в основном зависит от содержания в механическом составе глинистой фракции, ее минералогического состава [4].

Равновесие между изотопом Cs в сорбированных в твердой фазе почвы и почвенным раствором характеризуется константой распределения (K_d – отношение концентрации изотопа в твердой фазе к его концентрации в почвенном растворе). Данный параметр можно рассматривать в качестве показателя относительной биологической доступности радиоактивных изотопов Cs. Часто его включают в механистические и полумеханистические модели поведения радиоактивных изотопов цезия в системе «почва – растение» в качестве одного из ключевых элементов [5]. В зависимости от содержания глинистой фракции в механическом составе почвы и ее минералогического состава K_d радиоактивных изотопов Cs варьирует в диапазоне 10^1 – 10^5 [5].

Эмпирические данные, полученные при исследовании радиоэкологических последствий радиационных аварий и испытаний ядерного оружия, указывают на явление роста K_d с течением времени после попадания радиоактивных изотопов Cs в почву [6; 7]. Особенно сильный рост данного показателя происходит в первый год после выпадений. Катионы K^+ и NH_4^+ имеют характеристики, близкие к Cs^+ , поэтому с увеличением их концентрации в почвенном растворе радиоактивные изотопы цезия вытесняются из участков высокоспецифичной сорбции, а K_d уменьшается [2]. Органическое вещество почвы также способствует уменьшению значения коэффициента распределения радиоактивных изотопов Cs [5; 8]. Учет указанных факторов позволяет построить достаточно надежные полумеханистические модели поведения ^{134}Cs и ^{137}Cs в системе «почва – растение» для «свежих» выпадений, однако они не дают приемлемую точность прогноза для отдаленных сроков. Выполненный анализ показал, что основная проблема состоит в существенных различиях между реальными и предсказанными K_d [6]. Причина данного явления и другие существенные факторы, влияющие на K_d , до настоящего времени окончательно не установлены.

На этапе отдаленных последствий радиоактивных выпадений доля ^{137}Cs в почвенном растворе от валового запаса составляет доли процента даже при низком содержании глинистых минералов. В подобной системе незначительное смещение динамического равновесия в распределении радиоактивных изотопов Cs между твердой и жидкой фазами способно существенно изменить его содержание в почвенном растворе, что прямопропорционально отражается на биологической доступности радионуклида. На основании накопленных наблюдений за поведением ^{137}Cs в почвенно-растительном комплексе нами выдвинута гипотеза, что влажность почвы оказывает существенное влияние на K_d ^{137}Cs в отдаленном периоде после загрязнения. Цель исследования – проверка данной гипотезы.

Дополнительно решена задача по оценке влияния влажности почвы на скорость диффузии ^{137}Cs в этой неоднородной среде. При активном корневом поглощении ионов из почвенного раствора создается градиент их концентрации. Величина этого градиента зависит от влажности почвы [9], что объясняется снижением эффективного коэффициента диффузии ионов в почве при уменьшении ее влажности.

Материалы и методы исследования

Для проведения модельного эксперимента были отобраны образцы почвы на двух реперных участках, расположенных в центральной пойме р. Припять, на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника в окрестностях бывшего населенного пункта Красноселье. Образцы почвы для исследований на реперных участках отбирались на глубину 20 см и тщательно перемешивались.

Реперные участки имеют характерный для центральной поймы р. Припять почвенный и растительный покров, но различаются по степени увлажнения, гранулометрическому составу и агрохимическим показателям почвы.

Почва участка № 1 аллювиальная дерново-глееватая, развивающаяся на супесчаном аллювии. Грунтовые воды находятся на уровне 0,9–1,2 м. Растительность участка представлена разнотравно-осоково-злаковой ассоциацией.

Почва участка № 2 аллювиальная дерново-глеевая, развивающаяся на песчаном аллювии. Участок расположен в пониженном месте с высоким стоянием грунтовых вод (0,5–0,8 м). Растительный покров представлен разнотравно-осоковой ассоциацией, с наличием осоковых кочек.

Почва участка № 2 содержит существенно больше органического вещества (табл. 1). Обе почвы характеризуются повышенным содержанием обменного кальция, но низкой концентрацией подвижного калия. Исследуемые почвы относятся к среднекислым.

Для проведения модельного эксперимента образцы почвы массой 500–600 г (по воздушно-сухой массе) помещались в пластиковые сосуды, и их влажность весовым методом доводилась до 40 %, 70, 85 и 100 % от полной влагоемкости. Выбранный диапазон имитирует различные уровни увлажнения почвы, которые могут возникать в период вегетации (от засухи до переувлажнения). Сосуды накрывались полимерной пленкой и экспонировались при заданной влажности и комнатной температуре 70–80 суток. Каждый вариант эксперимента проводился в трехкратной повторности.

Сразу по окончании экспозиции оценивалась скорость диффузии ^{137}Cs в почве с использованием селективного сорбента, представляющего собой фильтровальную бумагу, пропитанную тетрафенилборатом натрия. Данный метод адаптирован из [10]. Для исключения непосредственного контакта сорбента с почвой на ее поверхность укладывалась смоченная дистиллированной водой фильтровальная бумага «чистая лента». Сорбент на поверхности почвы сменялся каждые 24 ч.

Таблица 1

Агрохимическая и радиологическая характеристика почв реперных участков

Table 1

Agrochemical and Radiological Characteristics of Soil at Reference Sites

Показатель	Участок № 1	Участок № 2
Гумус, %	3,25 ± 0,07	7,75 ± 0,16
pH _{KCl}	4,47 ± 0,20	4,34 ± 0,20
[Ca _{обм}], мг/кг	1394 ± 203	1253 ± 175
[Mg _{обм}], мг/кг	106,4 ± 10,7	101,1 ± 2,1
[NH ₄ ⁺ _{обм}], мг/кг	5,96 ± 0,89	14,82 ± 0,22
[K _{подв}], мг/кг	23,7 ± 0,4	29,3 ± 0,9
[P ₂ O ₅ _{подв}], мг/кг	55,5 ± 10,6	34 ± 4,6
Гигроскопическая влажность, %	3,26 ± 0,04	4,14 ± 0,07
Полная влагоемкость, %	58,4 ± 1,1	73,6 ± 0,8
[^{137}Cs], Бк/кг	5836 ± 344	7820 ± 460

По окончании времени экспозиции жидкая фаза почвы (почвенный раствор) извлекалась с использованием центрифуги лабораторной медицинской РС-6 в течение 60 мин на 3000 об./мин с использованием специальных стаканов с двойным дном и фильтром «синяя лента» под почвой.

Содержание ^{137}Cs в образцах определялось на гамма-спектрометрическом комплексе *Canberra* с коаксиальным полупроводниковым детектором *GX2018*. Для измерений образцы почвы и экстракты помещались в плоскую счетную мишень диаметром, равным диаметру детектора, и объемом 100 мл. В случаях, когда объем экстракта был ниже 100 мл, счетная мишень дополнялась дистиллированной водой с последующим пересчетом объемной активности на неразбавленный экстракт. Фильтровальная бумага с сорбентом измельчалась и ими заполнялась аналогичная счетная мишень. Для оценки активности ^{137}Cs по скорости счета в каналах полного фотопоглощения в области 662 кэВ использованы значения эффективности для данной геометрии с эталонными образцами почвы объемным весом 1,3 г/см³, водного раствора (1,0 г/см³), растительного материала (0,1 г/см³) для соответствующих образцов.

Математическую и статистическую обработку данных проводили в среде *iPython* с использованием библиотек *Pandas* и *SciPy* языка *Python*. Подготовка иллюстраций осуществлена с использованием библиотек *Matplotlib* и *Seaborn*. Для представления данных вычислялась средняя арифметическая величина, в качестве меры разброса данных использовано стандартное отклонение. Оценка значимости влияния фактора выполнена с использованием дисперсионного анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных результатов подтверждает выдвинутую гипотезу о зависимости концентрации ^{137}Cs в почвенном растворе от влажности почвы (рис. 1). Характер этой зависимости показывает, что источником изменения концентрации радионуклида в растворе является не только его концентрирование в растворителе при уменьшении количества воды в объеме почвы, но и отчетливо проявляется влияние характеристик почвы на концентрацию ^{137}Cs при различной влажности.

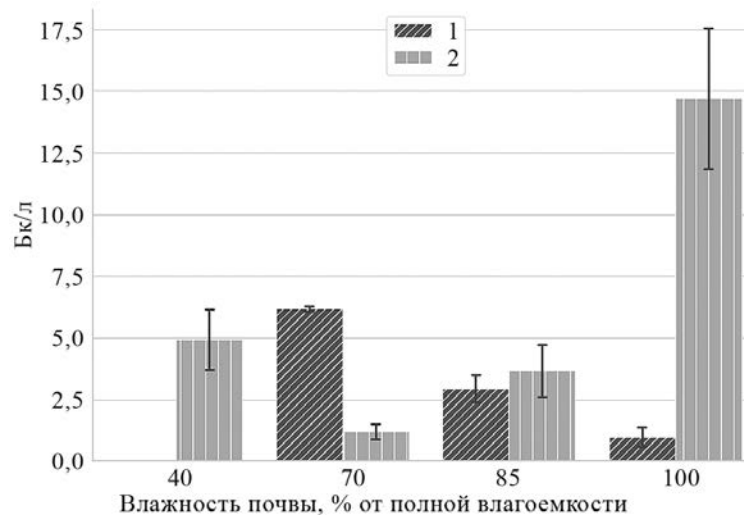


Рис. 1. Объемная активность ^{137}Cs в почвенном растворе в дерново-глеяватой супесчаной (1) и дерново-глеявой песчаной (2) аллювиальных почвах. Планки погрешностей – стандартное отклонение. Используемый метод не позволил извлечь достаточное для гамма-спектрометрического анализа количество почвенного раствора из дерново-глеяватой супесчаной почвы при влажности 40 % от полной влагоемкости

Fig. 1. Volume Activity of ^{137}Cs in Soil Solution in the Sod-Gleyed Sandy Loam (1) and Sod-Gley Sandy (2) Alluvial Soils. Error Bars – Standard Deviation. The used method did not allow extraction of a sufficient quantity of soil solution from the Podzolic-Gleyic Sandy Loam at 40 % of the full moisture capacity for gamma spectrometric analysis

Объемная активность ^{137}Cs в почвенном растворе аллювиальной дерново-глеявой песчаной почвы колебалась в диапазоне 1,2–4,9 Бк/л при содержании воды 40–85 % от полной влагоемкости. Однако рост влажности до 100 % от полной влагоемкости привел к резкому росту концентрации радионуклида в почвенном растворе до $14,7 \pm 3,5$ Бк/л. Наименьшее содержание ^{137}Cs в почвенном растворе зафиксировано при содержании воды в почве 70 % от полной влагоемкости. Содержание ^{137}Cs , в форме нахождения из которой происходит его непосредственное корневое поглощение, увеличивается в 10 раз при изменении влажности почвы с 70 до 100 % от полной влагоемкости.

В аллювиальной дерново-глеяватой супесчаной почве концентрация ^{137}Cs в почвенном растворе варьировала в диапазоне 1,0–6,2 Бк/л. Увеличение влажности с 70 до 100 % от полной влагоемкости приводит к постепенному уменьшению содержания радионуклида в растворенной форме более чем в 6 раз.

Механизмы смещения динамического равновесия ^{137}Cs между сорбированными в твердой фазе почвы и растворенным состоянием при изменении влагонасыщенности могут иметь различную природу. Уменьшение содержания воды в почве увеличивает концентрацию радионуклида в растворе. Одновременно с этим сужение межпакетных пространств слоистых глинистых минералов затрудняет выход Cs из участков высоко-специфической сорбции. Нельзя также упускать из вида межионные взаимодействия в почвенном растворе и почвенном поглощающем комплексе при изменении соотношения между жидкой и твердой фазами почвы.

Доля ^{137}Cs в почвенном растворе от его валового содержания в почве составила 0,01–0,14 % в аллювиальной дерново-глеявой песчаной почве и 0,01–0,04 % в аллювиальной дерново-глеяватой супесчаной почве. Верхняя граница этого показателя выше в почве с более низким содержанием глинистой фракции в ее механическом составе. Однако при определенных условиях – содержании воды 70 % от полной влагоемкости – доля радионуклида в почвенном растворе выше у супесчаной почвы.

Прямое измерение концентрации $^{137}\text{Cs}^+$ в почвенном растворе является довольно сложной процедурой и выполнимо лишь при достаточно высоких уровнях загрязнения, так как основной запас радионуклида обычно сорбирован в твердой фазе. Для оценки этого показателя обычно используют отношение удельной активности радионуклида в почве к коэффициенту распределения. Предложен ряд моделей для определения K_d ^{137}Cs [5; 11; 12], но ни одна из них не учитывает влияние влажности почвы. Результаты настоящих исследований показывают, что на этапе отдаленных последствий загрязнения K_d ^{137}Cs в аллювиальной

дерново-глееватой супесчаной почве увеличивается от $0,94 \times 10^3$ до $7,12 \times 10^3$ с увеличением содержания воды в ней от 70 до 100 % от полной влагоемкости. В аллювиальной дерново-глеевой песчаной почве K_d ^{137}Cs продемонстрировал наименьшие значения при полном насыщении почвы водой ($0,56 \times 10^3$). Понижение влажности до 70 % от полной влагоемкости приводит к постепенному росту данного показателя до $6,95 \times 10^3$, но при влажности 40 % он заметно снижается до $1,70 \times 10^3$.

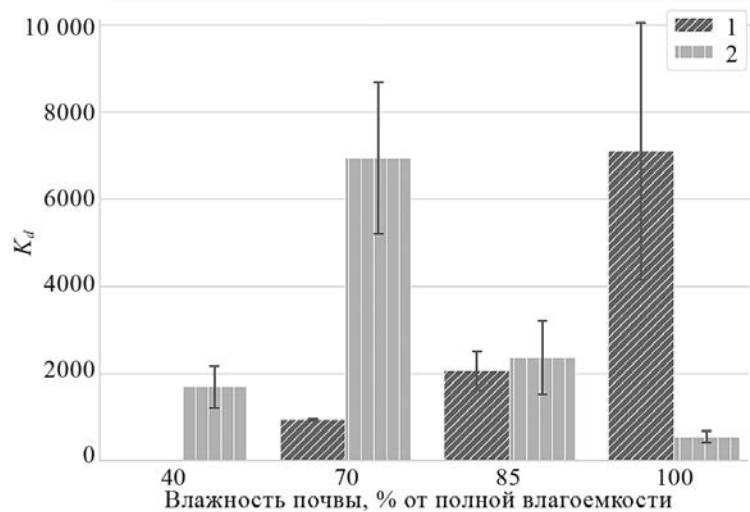


Рис. 2. Коэффициент распределения ^{137}Cs между твердой фазой почвы и почвенным раствором в дерново-глееватой супесчаной (1) и дерново-глеевой песчаной (2) аллювиальных почвах. Планки погрешностей – стандартное отклонение

Fig. 2. Distribution Coefficient of ^{137}Cs between the Solid Phase of Soil and Soil Solution in Sod-Gleyed Sandy Loam (1) and Sod-Gley Sandy (2) Alluvial Soils. Error Bars – Standard Deviation

При полном насыщении почвы влагой K_d ^{137}Cs в аллювиальной песчаной почве в 12,8 раз меньше, чем в супесчаной, что согласуется с наблюдаемой более высокой биологической доступностью радионуклида на песчаных почвах. Однако такое соотношение не сохраняется во всем исследованном диапазоне влажности почвы: при 85 % K_d ^{137}Cs в почвах с обоих участков имеет очень близкие значения, а при 70 % – K_d в супесчаной почве в 7,3 раза больше, чем в песчаной. При уменьшении содержания влаги в почве происходит концентрирование в почвенном растворе не только $^{137}\text{Cs}^+$, но и других катионов и анионов, концентрация которых выше на порядок. Также происходит сближение пакетов слоистых глинистых минералов, что усиливает связывание ими Cs. Эти явления оказывают разнонаправленное воздействие на распределение ^{137}Cs между твердой фазой и почвенным раствором.

Двухфакторный дисперсионный анализ свидетельствует, что объемная активность ^{137}Cs в почвенном растворе имеет значимую зависимость от содержания воды в почве, а также от других ее характеристик (табл. 2).

Таблица 2

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа влияния влажности и характеристик почвы на объемную активность ^{137}Cs в почвенном растворе (A_o) и коэффициент распределения радионуклида (K_d)

Table 2

Results of Two-Way ANOVA for the Influence of Moisture and Soil Characteristics on the Volume Activity of ^{137}Cs in Soil Solution (A_o) and the Distribution Coefficient of the Radionuclide (K_d)

Фактор	A_o , Бк/л	K_d
Влажность почвы	11,525**	3,712*
	0,227	0,122
Характеристики почвы	10,610**	0,137
	0,069	–0,013
Совместное влияние факторов	26,970	14,213**
	0,560	0,592

Примечание. Над чертой – F-критерий Фишера, под чертой – сила влияния фактора (ω^2), * – влияние фактора достоверно на уровне значимости $p < 0,05$, ** – влияние фактора достоверно на уровне значимости $p < 0,01$.

Для величины K_d наиболее выражена зависимость от совместного влияния влажности почвы и других ее характеристик. Статистическая значимость влияния только влажности почвы ниже. Дисперсионный анализ не позволил подтвердить влияние особенностей аллювиальной почвы, определяемых местом ее отбора, на K_d . Наличие статистически значимой зависимости объемной активности радиоуклида от характеристик почвы и ее отсутствие в отношении K_d можно объяснить тем, что среди всех особенностей, включенных в анализ образцов аллювиальной почвы, наибольшее влияние на этот показатель оказывает валовое содержание радионуклида. Влияние этого фактора на K_d исчезает, так как он входит в знаменатель при вычислении коэффициента распределения.

Полученные нами значения K_d ^{137}Cs для аллювиальных почв находятся преимущественно у нижней границы диапазона, приведенного в обобщении [5] для минеральных почв при сроке после загрязнения более года, что согласуется с довольно высокой биологической доступностью радионуклида в пойменных почвах. Обнаруженные зависимости в определенной мере согласуются с результатами эксперимента с искусственным загрязнением образцов дерново-луговой почвы [13]: при массовой доле воды в почве 30 % (что близко к 100 % от полной влагоемкости) наблюдается резкое увеличение концентрации ^{137}Cs в почвенном растворе с падением коэффициента распределения от 4 до 1×10^3 . После прокаливании почвы концентрация радионуклида в почвенном растворе закономерно уменьшалась с увеличением влажности. Поэтому авторы полагают, что в наблюдаемом явлении важная роль принадлежит органическому веществу.

Таким образом, K_d ^{137}Cs в одной и той же почве может варьировать на порядок величины при изменении содержания в ней влаги. Ранее нами было показано, что содержание в почве биодоступных форм ^{137}Cs может изменяться под воздействием микроорганизмов [14]. О влиянии на нее концентрации макроэлементов свидетельствуют результаты наших наблюдений [15]. Таким образом, динамическое равновесие между растворенным и сорбированным состоянием ^{137}Cs может изменяться под влиянием влажности почвы, активности микроорганизмов, таких катионов, как Ca^{2+} , K^+ , Cs^+ , NH_4^+ и других факторов. Поскольку на этапе отдаленных последствий радиоактивных выпадений в почвенном растворе находится лишь незначительная доля ^{137}Cs , а в лабильном – от трети до половины запаса [15], то даже незначительное смещение динамического равновесия между этими формами должно вызывать сильное изменение биологической доступности радионуклида. Это отражается на наблюдаемой пространственной и временной вариабельности параметров накопления ^{137}Cs растениями.

Для корневого потребления K и Cs прежде всего важно их содержание в ризосфере. При активном потреблении ионов из почвенного раствора возникает градиент их концентрации между ризосферой и почвенным раствором. Величина этого градиента определяется, с одной стороны, скоростью потребления ионов корнями, с другой – скоростью их диффузии из общего объема почвенного раствора. Результаты эксперимента демонстрируют зависимость скорости диффузии $^{137}\text{Cs}^+$ от влажности аллювиальной почвы (рис. 3). Скорость диффузии измерена дважды – в первые сутки после помещения поглощающего материала на поверхность почвы, и на пятые сутки – после постоянной сорбции $^{137}\text{Cs}^+$. Последнее имитирует ситуацию, близкую к динамическому равновесию в системе, и позволяет оценить совокупность процессов, обеспечивающих восполнение запаса катионов в ризосфере, включающего собственно диффузию и их выход из сорбированного состояния в почвенный раствор.

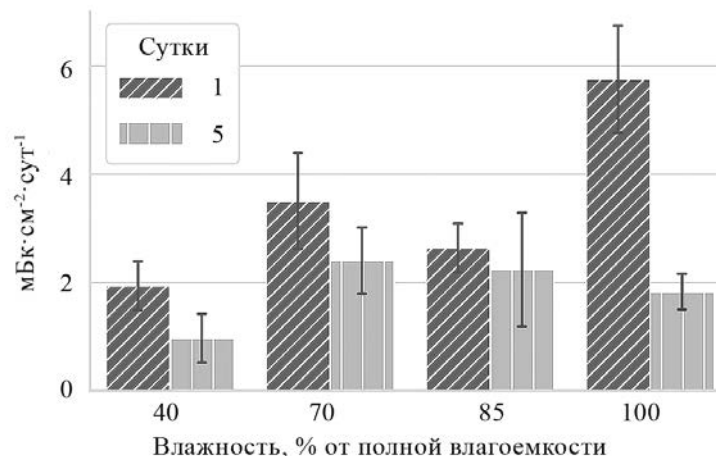


Рис. 3. Скорость диффузии ^{137}Cs в аллювиальной дерново-глееватой супесчаной почве при различной влажности почвы на 1 и 5 сутки после создания градиента концентрации. Планки погрешностей – стандартное отклонение

Fig. 3. Diffusion Rate of ^{137}Cs in Alluvial Sod-Gleyed Loamy Soil at Different Soil Moisture Levels on Days 1 and 5 After Establishing the Concentration Gradient. Error Bars – Standard Deviation

При полном насыщении влагой аллювиальной дерново-глееватой супесчаной почвы наблюдается существенно более высокая скорость диффузии $^{137}\text{Cs}^+$ в первые 24 ч после создания градиента концентрации по сравнению с образцами почвы, имеющими влажность 40–85 % от полной влагоемкости. Минимальная скорость диффузии $^{137}\text{Cs}^+$ в первые сутки зафиксирована при наиболее низкой влажности почвы.

Приведенные в настоящей статье данные свидетельствуют, что концентрация катионов $^{137}\text{Cs}^+$ в почвенном растворе не остается одинаковой при различной влажности почвы, что непосредственно сказывается на градиенте концентрации. Поэтому для оценки эффективного коэффициента диффузии необходимо нормировать измеренную скорость диффузии на градиент концентрации. Расчеты показывают, что отношение скорости диффузии к градиенту концентрации $^{137}\text{Cs}^+$ в первые сутки составляет 0,6; 0,9 и 7,8 для влажности 70 %, 85 и 100 % от полной влагоемкости соответственно. Таким образом, экспериментальные данные подтверждают резкое уменьшение эффективного коэффициента диффузии $^{137}\text{Cs}^+$ в почвенном растворе при уменьшении содержания влаги в супесчаной почве от 100 до 85 % от полной влагоемкости. При уменьшении влажности почвы еще на 15 % эффективный коэффициент диффузии падает не столь резко.

При близком к равновесному состоянию в системе с активной сорбцией ^{137}Cs скорость диффузии уменьшается при всех вариантах влажности почвы. Наиболее сильная разница в скорости диффузии на первые и пятые сутки наблюдается в варианте с влажностью почвы 100 % от полной влагоемкости, несколько ниже – при 40 %. Отсутствие существенной разницы в скорости диффузии ^{137}Cs между различными сроками при влажности почвы 70 и 85 % от полной влагоемкости указывает на то, что основным лимитирующим явлением, влияющим на подвижность радионуклида в этих условиях, становится собственно диффузия. Сближение пакетов в глинистых минералах при уменьшении влажности почвы до 40 % от полной влагоемкости затрудняет выход Cs из сорбированного состояния в почвенный раствор, что вызывает практически двукратное уменьшение его подвижности. Резкое падение скорости диффузии ^{137}Cs при установлении равновесия в почве с влажностью 100 % от полной влагоемкости обусловлено как более низкой концентрацией радионуклида в почвенном растворе, так и, вероятно, повышением сорбирующей способности органического вещества почвы в отношении радионуклида, как это было установлено в экспериментах [13].

Заключение

В эксперименте с аллювиальными почвами показано, что режим увлажнения оказывает существенное влияние на объемную активность ^{137}Cs в почвенном растворе и скорость его диффузии, что непосредственно влияет на биологическую доступность радионуклида. Минимальные значения коэффициента распределения ^{137}Cs между сорбированным в твердой фазе и растворенным в почвенном растворе состоянием в аллювиальной дерново-глееватой супесчаной почве наблюдаются при влажности 70 % от полной влагоемкости, в аллювиальной дерново-глеевой песчаной почве – при влажности 100 %. Изменения коэффициента распределения радионуклида при разной влажности почвы могут достигать десяти раз и более.

Скорость диффузии ^{137}Cs в аллювиальной дерново-глееватой супесчаной почве при установлении динамического равновесия принимает наибольшие значения при влажности 70–85 % от полной влагоемкости, при полном влагонасыщении почвы она несколько снижается и падает в два раза при уменьшении влажности до 40 %.

Библиографические ссылки

1. Smolders E, Brande KV, den, Merckx R. Concentrations of ^{137}Cs and K in Soil Solution Predict the Plant Availability of ^{137}Cs in Soils. *Environmental Science & Technology*. 1997;31(12):3432–3438. <https://doi.org/10.1021/es970113r>.
2. Wauters J, Elsen A, Cremers A, et al. Prediction of Solid/Liquid Distribution Coefficients of Radiocaesium in Soils and Sediments. Part One: a Simplified Procedure for the Solid Phase Characterisation. *Applied Geochemistry*. 1996;11(4):589–594. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(96\)00028-5](https://doi.org/10.1016/0883-2927(96)00028-5).
3. Fried M, Broeshart H. The Soil-Plant System. In: Relation To Inorganic Nutrition. New York, San Francisco, London: Academic Press; 1967.
4. Uematsu S, Smolders E, Sweeck L, et al. Predicting Radiocaesium Sorption Characteristics With Soil Chemical Properties for Japanese Soils. *Science of The Total Environment*. 2015;524–525:148–156. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.028>.
5. Ramírez-Guínart O, Kaplan D, Rigol A, et al. Deriving Probabilistic Soil Distribution Coefficients (Kd). Part 2. Reducing Caesium Kd Uncertainty By Accounting for Experimental Approach and Soil Properties. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;223–224:106407. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106407>.
6. Brimo K, Pourcelot L, Métivier JM. Evaluation of Semi-Mechanistic Models To Predict Soil To Grass Transfer Factor of ^{137}Cs Based on Long Term Observations in French Pastures. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;227:106467. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106467>.
7. Гребенщикова НВ, Подоляк АГ, Паленшанова ГИ. Динамика биологической подвижности ^{137}Cs и ^{90}Sr в луговых экосистемах Белорусского Полесья. В: *Итоги научных исследований в области радиоэкологии окружающей среды за десятилетний период после аварии на Чернобыльской АЭС*. Гомель: [б. и.]; 1996. с. 27–33.

8. Пристер БС, Перепелятникова ЛВ, Дугинов ВИ, и др. Основные факторы, определяющие поведение радионуклидов в системе почва-растения. В: *Проблемы сельскохозяйственной радиологии. Сборник научных трудов*. 1992;2(2):108–117.
9. Kuchenbuch R, Claassen N, Jungk A. Potassium Availability in Relation To Soil Moisture. I. Effect of soil moisture on potassium diffusion, root growth and potassium uptake of onion plants. *Plant and Soil*. 1986;95(2):221–231.
10. Vaidyanathan LV, Nye PH. The measurement and mechanism of ion diffusion in soils. *Journal of Soil Science*. 1966;17(2):175–183. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1966.tb01464.x>.
11. Sheppard SC. Robust Prediction of Kd From Soil Properties for Environmental Assessment. *Human and Ecological Risk Assessment. International Journal*. 2011;17(1):263–279. <https://doi.org/10.1080/10807039.2011.538641>.
12. Tarsitano D, Young SD, Crout NM. Journal Evaluating and Reducing a Model of Radiocaesium Soil-Plant Uptake. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2011;102(3):262–269. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.11.017>.
13. Куликов НВ, Молчанова ИВ, Караваева ЕН. *Радиоэкология почвенно-растительного покрова*. Свердловск: УрО АН СССР; 1990.
14. Nikitin AN, Cheshyk IA, Gutseva GZ, et al. Impact of Effective Microorganisms on the Transfer of Radioactive Cesium Into Lettuce and Barley Biomass. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;192:491–497. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.08.005>.
15. Никитин АН, Шуранкова ОА, Калинин С.А., и др. Особенности накопления ^{137}Cs растениями травянистых сообществ в ближней зоне Чернобыльской АЭС на этапе отдаленных последствий радиационной аварии. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;2:57–67. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-2-57-67>.

References

1. Smolders E, Brande KV, den, Merckx R. Concentrations of ^{137}Cs and K in Soil Solution Predict the Plant Availability of ^{137}Cs in Soils. *Environmental Science & Technology*. 1997;31(12):3432–3438. <https://doi.org/10.1021/es970113r>.
2. Wauters J, Elsen A, Cremers A, et al. Prediction of Solid/liquid Distribution Coefficients of Radiocaesium in Soils and Sediments. Part One: a Simplified Procedure for the Solid Phase Characterisation. *Applied Geochemistry*. 1996;11(4):589–594. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(96\)00028-5](https://doi.org/10.1016/0883-2927(96)00028-5).
3. Fried M, Broeshart H. The Soil-Plant System. In: *Relation To Inorganic Nutrition*. New York, San Francisco, London: Academic Press; 1967.
4. Uematsu S, Smolders E, Sweeck L, et al. Predicting Radiocaesium Sorption Characteristics With Soil Chemical Properties for Japanese Soils. *Science of The Total Environment*. 2015;524–525:148–156. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.028>.
5. Ramirez-Guinart O, Kaplan D, Rigol A, et al. Deriving Probabilistic Soil Distribution Coefficients (Kd). Part 2. Reducing Caesium Kd Uncertainty By Accounting for Experimental Approach and Soil Properties. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020;223–224:106407. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106407>.
6. Brimo K, Pourcelot L, Métivier JM. Evaluation of Semi-Mechanistic Models To Predict Soil To Grass Transfer Factor of ^{137}Cs Based on Long Term Observations in French Pastures. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;227:106467. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106467>.
7. Grebenshchikova NV, Podolyak AG, Palenshanova GI. *Dinamika biologicheskoy podvizhnosti ^{137}Cs i ^{90}Sr v lugovykh ekosistemakh Belorusskogo Poles'ya* [Dynamics of biological mobility of ^{137}Cs and ^{90}Sr in meadow ecosystems of the Belarusian Polesie]. In: *Itogi nauchnyh issledovaniy v oblasti radioekologii okruzhayushchej sredy za desyatiletnij period posle avrii na Chernobyl'skoj AES = Results of scientific research in the field of environmental radioecology for a ten-year period after the accident at the Chernobyl nuclear power plant*. Gomel: [publisher unknown]; 1996. p. 27–33. Russian.
8. Prister BS, Perepyatnikova LV, Duginov VI, Homutin YuV. The main factors determining the behavior of radionuclides in the soil-plant system. In: *Problemy sel'skhozaystvennoj radiologii* [Problems of agricultural radiology]. 1992;2(2):108–117. Russian.
9. Kuchenbuch R, Claassen N, Jungk A. Potassium Availability in Relation To Soil Moisture. I. Effect of soil moisture on potassium diffusion, root growth and potassium uptake of onion plants. *Plant and Soil*. 1986;95(2):221–231. DOI: 10.1007/bf02375074.
10. Vaidyanathan LV, Nye PH. The measurement and mechanism of ion diffusion in soils. *Journal of Soil Science*. 1966;17(2):175–183. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1966.tb01464.x>.
11. Sheppard SC. Robust Prediction of Kd From Soil Properties for Environmental Assessment. *Human and Ecological Risk Assessment. International Journal*. 2011;17(1):263–279. <https://doi.org/10.1080/10807039.2011.538641>.
12. Tarsitano D, Young SD, Crout NM. Journal Evaluating and Reducing a Model of Radiocaesium Soil-Plant Uptake. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2011;102(3):262–269. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.11.017>.
13. Kulikov NV, Molchanova IV, Karavaeva EN. *Radioekologiya pochvenno-rastitel'nogo pokrova* [Radioecology of soil and vegetation cover]. Sverdlovsk: Ural Branch of the USSR Academy of Sciences; 1990. 173 p. Russian.
14. Nikitin AN, Cheshyk IA, Gutseva GZ, et al. Impact of Effective Microorganisms on the Transfer of Radioactive Cesium Into Lettuce and Barley Biomass. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;192:491–497. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.08.005>.
15. Nikitin AN, Shurankova OA, Kalinichenko SA, Mishchanka EV, Leferd GA. Patterns of ^{137}Cs accumulation in herbaceous plant communities near the Chernobyl nuclear power plant in the aftermath of the accident. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya* [Journal of the Belarusian State University. Ecology]. 2024;2:57–67. DOI: 10.46646/2521-683X/2024-2-57-67. Russian.

Статья поступила в редколлегию 11.02.2025.
Received by editorial board 11.02.2025.

УДК 629.039.58

ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПРОТИВОСТОЯНИЯ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИМ РИСКАМ И БЕДСТВИЯМ

М. Г. ГЕРМЕНЧУК¹⁾

¹⁾Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

Широкое использование ядерной энергии в целях научного и экономического прогресса, улучшение качества жизни человека, решение иных социальных или военных задач создают новые источники рисков и угроз антропогенного характера (радиоэкологические), последствия которых могут усугубляться бедствиями природного характера (экологическими, гидрометеорологическими, сейсмологическими и др.). В последние десятилетия наблюдается стремительный рост количества источников рисков и масштабов последствий бедствий, вызванных радиоэкологическими угрозами. Международное сообщество для решения глобальной задачи противостояния и повышения готовности к реагированию на них в рамках Хиогской и Сендайской программ действий разработало общие подходы для формирования механизмов управления рисками, которые также применимы для управления радиоэкологическими рисками. Показано, что в Республике Беларусь успешно реализуются основные приоритеты Хиогской и Сендайской программ действий, в том числе в виде Внешнего плана реагирования на аварийную ситуацию на Белорусской АЭС. Особо отмечено, что на настоящем этапе системное внедрение превентивного подхода повышает потенциал Республики Беларусь в части противостояния радиоэкологическим бедствиям за счет автоматизации систем раннего оповещения с использованием IT- и IA-технологий. Представлен Алгоритм действий по управлению рисками в сфере обеспечения радиационной безопасности в Республике Беларусь, предусматривающий функционирование механизмов управления радиоэкологическими/радиоэкологическими рисками.

Ключевые слова: обеспечение радиационной безопасности (далее – ОРБ); потенциал противостояния радиоэкологическим рискам и бедствиям; Хиогская и Сендайская программы действий; раннее оповещение.

GENERAL MECHANISMS FOR COUNTERING RADIOECOLOGICAL RISKS AND DISASTERS

M. G. GERMENCHUK^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

The widespread use of nuclear energy for the purposes of scientific and economic progress, improving the quality of human life, solving other social or military problems, creates new sources of risks, threats and disasters of an anthropogenic nature (radioecological disasters), the consequences of which can be aggravated by natural disasters (environmental, hydrometeorological, seismological, others). In recent decades, there has been a rapid increase in the number of sources of risks and the scale of the consequences of disasters caused by radioecological risks.

Образец цитирования:

Герменчук МГ. Основные механизмы противостояния радиоэкологическим рискам и бедствиям. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;2:40–51. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-40-51>

For citation:

Germenchuk MG. General mechanisms for countering radioecological risks and disasters. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;2:40–51. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-40-51>

Автор:

Герменчук Мария Григорьевна – кандидат технических наук, доцент; заместитель директора по научной работе.

Author:

Maria G. Germenchuk, PhD (engineering), docent; deputy director for research.
germenchuk@iseu.by

The international community, in order to meet the global challenge of confronting and improving preparedness for disaster response within the framework of the Hyogo and Sendai framework for action, has developed common approaches for the formation of risk management mechanisms that are also applicable to the management of radioecological risks. It is shown that the Republic of Belarus is successfully implementing the main priorities of the Hyogo and Sendai framework for action, including in the form of an External Emergency Response Plan for the Belarusian NPP. It was especially noted that at the present stage, the systemic introduction of preventive increases the potential of the Republic of Belarus in terms of countering radioecological disasters, including through the automatization of early warning systems, including using IT and AI technologies. The Algorithm of actions for risk management in the field of radiation safety in the Republic of Belarus was presented, providing for the functioning of mechanisms for managing radiological/radioecological risks:

Keywords: radiation safety; potential for confronting radioecological risks and disasters; Hyogo and Sendai framework for action; early warning.

Введение

Для научного обоснования и сопровождения деятельности в сфере противодействия рискам, угрозам и бедствиям радиоэкологического характера целесообразно рассмотреть и адаптировать к условиям Республики Беларусь общие научно-методические и практические подходы к снижению рисков бедствий для последующих оценок и стратегий формирования и поддержания потенциала противодействия на национальном и региональном уровнях.

Анализ рисков и бедствий радиоэкологического характера свидетельствует, что начиная с 1940-х гг. идет стремительное нарастание количества источников рисков и бедствий, а также масштабов последствий в случае их реализации. Так, в период 1949–2024 гг. были зафиксированы и описаны в открытых источниках 8 ядерных и радиационных аварий и катастроф, уровень которых по шкале INES составляет от 4 (авария с локальными последствиями) до максимального уровня 7 (глобальная авария)¹. Также известно, что с 1945 по 2003 г. были опубликованы сведения о 59 случаях ядерных аварий с возникновением самоподдерживающейся цепной реакцией (далее – СЦР), из них 37 при проведении экспериментов на реакторах и критических сборках [1].

Наибольшее количество случаев аварий на промышленных предприятиях зафиксировано в бывшем СССР – 13, в том числе на ПО «Маяк» – 7 (г. Озерск, 15 марта 1953, 21 апреля 1957, 2 января 1958, 5 декабря 1960, 7 сентября 1962, 16 декабря 1965, 10 декабря 1968), на Сибирском химическом комбинате – 4 (г. Северск, Завод разделения изотопов, 14 июля 1961, химико-металлургический завод, 30 января 1963, 2 декабря 1963, 13 декабря 1978), а также Машиностроительный завод в г. Электросталь (3 ноября 1965) и Новосибирский завод химических концентратов (15 мая 1997).

В этот период в США зафиксированы 7 случаев промышленных аварий с возникновением СЦР, в том числе на радиохимическом заводе Y-12 (Окридж, 16 июня 1958), в Лос-Аламосской Национальной лаборатории (30 декабря 1958), на радиохимическом заводе в штате Айдахо (16 октября 1959, 25 января 1961, 17 октября 1978), на заводе в Ханфорде в штате Вашингтон (7 апреля 1962), завод по переработке топлива компании UNF в штате Рок-Айленд (24 июля 1964).

Кроме того, известно об авариях с СЦР в Великобритании (Виндскейл, 24 августа 1970) и Японии на заводе по изготовлению топлива (Токаймура, 30 сентября 1999).

При проведении экспериментов на реакторах и критических сборках в США были зафиксированы 26 случаев возникновения аварий с СЦР, в том числе в Лос-Аламосской Национальной лаборатории (11 февраля 1945, 6 июня 1945, 21 августа 1945, 21 мая 1946, декабрь 1949, 1 февраля 1951, 18 апреля 1952, 3 февраля 1954, 3 июня 1956, 12 февраля 1957, 17 июня 1960, 11 декабря 1962), на заводе в Ханфорде в штате Вашингтон (16 ноября 1951), Окриджской Национальной лаборатории (26 мая 1954, 1 февраля 1956, 30 января 1968, 10 ноября 1961), в Ливерморской лаборатории им. Лоуренса (26 марта 1963), на ракетном полигоне Уайт Сендз (28 мая 1965), на испытательном полигоне Абердин, штат Мериленд (6 сентября 1968), в Арагонской национальной лаборатории (2 июня 1952), в Национальной испытательной станции ядерных реакторов в Айдахо (22 июля 1954, 3 января 1961, 5 ноября 1962, 29 ноября 1955, 18 ноября 1958).

В бывшем СССР зафиксированы 6 случаев возникновения СЦР во время аварий при проведении экспериментов на реакторах и критических сборках, в том числе в ВНИИЭФ в г. Саров/Арзамас – 16 (9 апреля 1953, 11 апреля 1963, 17 июня 1997), Челябинске-70 (5 апреля 1968), в Российский научный центр «Курчатовский институт» г. Москва (15 февраля 1971, 26 мая 1971).

В Канаде были зафиксированы 2 случая аварий с СЦР в лаборатории Чок-Ривер (в конце 40-х – начале 1950-х гг., а также 12 декабря 1952).

¹Обзор ядерных аварий с возникновением СЦР [Электронный ресурс]. Лос-Аламосская Национальная лаборатория, США, 2003. URL: <https://ncsp.llnl.gov/sites/ncsp/files/2021-05/la-13638-tr.pdf> (дата обращения: 20.05.2025).

Известны аварии с СЦР в Бельгии (Мол, 30 декабря 1965), во Франции (Центр ядерных исследований в Сакле, 15 марта 1960) и в бывшей Югославии в Институте Бориса Кидрича (15 октября 1958).

Кроме того, к перечисленным выше событиям необходимо добавить глобальные ядерные катастрофы XX и XXI в.: аварии на Чернобыльской (26 апреля 1986) и Фукусимской АЭС (11 марта 2011), а также иные события, например, авария на Ленинградской АЭС (30 ноября 1975), АЭС «Три-Майл-Айленд» (28 марта 1979) или авария на АЭС «Сен Лоран-дез О» (13 марта 1980), пожар на АЭС Вандельос в Испании (19 октября 1989) и др.

Следует отметить, что такой анализ не может считаться полным в силу объективных и субъективных причин: в 40–50 гг. XX в. фиксировались в основном аварии с наличием СЦР, иным событиям не всегда давалась оценка, адекватная с позиций ОРБ в настоящее время, кроме того, информация о ядерных исследованиях всегда имеет конфиденциальный статус, поэтому в открытом доступе представлены далеко не все сведения, а оценки событий могут быть неполными, поэтому следует принять, что количество зафиксированных событий, важных для ОРБ, не отражает реальную ситуацию. Однако можно утверждать, что, начиная с 1945 г., в мире произошло не менее 100 событий, важных для ОРБ, которые стали, или могли стать, источниками радиологических/радиоэкологических бедствий разного масштаба (от локальных до глобальных).

Перевозка ядерных и радиоактивных материалов является постоянным источником потенциальных бедствий радиологического и радиоэкологического характера, требует постоянных системных мер по управлению такими рисками. Отметим, что, по оценкам МАГАТЭ, ежегодно осуществляется 20 млн поставок либо одной упаковки, либо нескольких упаковок радиоактивного материала [2].

Кроме того, в сфере ОРБ особое внимание уделяется обращению с ядерными материалами и радиоактивными отходами, темпы и объемы образования которых как в ядерных, так и добывающих отраслях постоянно возрастают.

Концепция национальной безопасности Республики Беларусь (далее – Концепция) определяет, что основными национальными интересами в экологической сфере являются, в числе прочих, преодоление негативных последствий радиоактивного загрязнения территории страны и иных чрезвычайных ситуаций, реабилитация экологически нарушенных территорий (п. 17). При этом к основным угрозам национальной безопасности относится радиоактивное загрязнение почв, земель, вод, недр, растительности и атмосферы (п. 29). Согласно Концепции, незаконный оборот радиоактивных веществ и материалов (п. 40) также является источником радиоэкологических угроз и рисков².

В настоящее время в Республике Беларусь выявлены 15 основных действующих и потенциальных источников радиоэкологических рисков и бедствий, в том числе, радиоактивное загрязнение окружающей среды вследствие испытаний ядерного оружия и радиационной катастрофы на Чернобыльской АЭС, Белорусская, Ровенская, Смоленская, Игналинская АЭС, ГНУ «ОИЭЯИ-СОСНЫ», пункты захоронения отходов дезактивации на «чернобыльских» территориях, КУП «Экорес», источники ионизирующего излучения, используемые в организациях, действующих на территории страны, ранее утерянные источники ионизирующего излучения, а также планируемые к строительству ОИАЭ и объекты по обращению с РАО, строительство хранилищ радиоактивных отходов на промплощадках Игналинской АЭС при выводе станции из эксплуатации, транспортировка радиоактивных материалов через территорию Республики Беларусь, незаконное использование радиоактивных материалов и источников ионизирующего излучения (далее – ИИИ), в том числе ИИИ, санкционированно перевозимые по территории страны, радиологический/ядерный терроризм, утерянные источники ионизирующего излучения, трансграничный перенос загрязняющих веществ на территорию Республики Беларусь воздушными и водными потоками, в том числе в аварийной ситуации [3–5].

Материалы и методы исследования

Анализ источников радиоэкологических рисков и бедствий на глобальном уровне, а также их последствий для обеспечения ОРБ, опубликованных Международным агентством по атомной энергии, Научным комитетом по действию атомной радиации (далее – МАГАТЭ, НКДАР) и другими организациями ООН, показывает, что можно выделить шесть основных категорий источников, которые охватывают основные направления деятельности с использованием ядерной энергии и радиоактивных веществ и их последствия:

I. Ядерные и радиационные аварии и катастрофы, в том числе на ядерных и реакторных установках, промышленные аварии, аварии с бесхозными ИИИ, аварии с космическими кораблями и спутниками, случайные сбросы в мировой океан и др.

²Концепция национальной безопасности Республики Беларусь [Электронный ресурс]. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Минск. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P924v0005> (дата обращения: 17.05.2025).

II. Ядерные взрывы в мирных целях.

III. Добыча естественных радиоактивных материалов.

IV. Ядерное наследие, в том числе радиоактивное загрязнение окружающей среды вследствие испытаний ядерного оружия и радиационных аварий / катастроф.

V. Сброс радиоактивных материалов в мировой океан.

VI. Транспортировка радиоактивных материалов.

Отметим, что Республика Беларусь широко вовлечена в глобальные процессы деятельности с использованием ядерной энергии и радиоактивных веществ, поэтому из шести выделенных категорий деятельности и их последствий актуальными являются четыре, за исключением ядерных взрывов в мирных целях и сброса радиоактивных материалов в мировой океан.

Мировым сообществом последовательно разработаны несколько основополагающих документов по противодействию природным/стихийным и техногенным бедствиям:

Международные рамки действий для Международного десятилетия по уменьшению опасности стихийных бедствий (1989 г.).

Йокогамская стратегия по обеспечению более безопасного мира: руководящие принципы предотвращения стихийных бедствий, обеспечения готовности и смягчения их последствий и План действий (1994 г.).

Международная стратегия уменьшения опасности бедствий (1999 г.).

Хиогская рамочная программа действий (ХПД) на 2005–2015 гг. (далее – ХПД).

Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. (далее – СРП).

Первоначально в центре внимания этих документов находились природные/стихийные бедствия, однако общественная практика в сфере уменьшения опасности бедствий показала, что разработанная методология (принципы, стратегии, рамочные программы) может быть использована для предотвращения и минимизации антропогенных/техногенных бедствий радиоэкологического характера и их последствий. Далее этот методологический прием применяется для анализа общественной практике предотвращения и минимизации последствий радиоэкологических бедствий в условиях Республики Беларусь.

Следует отметить, что феномен взаимодействия источников бедствий с факторами уязвимости природного и техногенного характера является объективным свойством мира и имеет разнообразные проявления, важные для целей ОРБ, что необходимо учитывать при выборе стратегий и формировании программ. Взаимодействие природных опасностей с факторами уязвимости может стать источником антропогенных опасностей. Например, взаимодействие гидрометеорологических и/или сейсмических факторов уязвимости со строительными конструкциями объектов при использовании атомной энергии (далее – ОИАЭ) могут привести к радиационной катастрофе техногенного характера, как это случилось на Фукусимской АЭС в 2011 г.

С другой стороны, взаимодействия первичных техногенных факторов с факторами уязвимости физического, социального, экономического и экологического характера могут многократно увеличить масштабы последствий возникшего бедствия. Примером служит катастрофа на Чернобыльской АЭС в 1986 г., когда источник события имел антропогенный характер. В результате возникла техногенная катастрофа, которая, взаимодействуя с природными (гидрометеорологическими) факторами уязвимости, создала беспрецедентное по своим масштабам радиоэкологическое бедствие.

Глобальное радиоактивное загрязнение Северного полушария Земли за счет переноса радиоактивности в окружающей среде вследствие испытаний ядерного оружия и крупных радиационных катастроф, например, на Чернобыльской и Фукусимской АЭС, возникло в результате взаимодействия с физическими (гидрометеорологическим) факторами. Ущерб здоровью населения за счет высоких доз облучения возник за счет экологических и социальных факторов, а окружающей среде и экономике – в результате сочетания гидрометеорологических, экологических и экономических факторов.

Масштабы последствий взаимодействия первичных факторов с факторами уязвимости определяются на основе эмпирических данных по оценке радиационной обстановки, по результатам радиационного мониторинга окружающей среды. Для реализации превентивного подхода в части долгосрочного аварийного планирования, а также прогноза радиационной обстановки в окружающей среде, необходимо применять методы математического моделирования, в том числе для картирования загрязнения, которые, в том числе основаны на расчете параметров взаимодействия первичных факторов и факторов уязвимости (источник выброса/сброса → гидрометеорологические факторы → загрязнение окружающей среды или гидрометеорологические факторы/сейсмические факторы → воздействие на источник выброса/сброса → гидрометеорологические факторы → загрязнение окружающей среды). Для эффективной реализации такого метода необходимы организационные решения в части обмена информацией между Национальной системой мониторинга окружающей среды (далее – НСМОС), системой мониторинга чрезвычайных ситуаций и санитарно-гигиенического мониторинга.

В настоящее время наибольший методологический и практический интерес для целей ОРБ представляет Хиогская рамочная программа действий, определившая основные приоритеты деятельности, и Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий как ее дальнейшее развитие, участницей которых является Республика Беларусь^{3, 4}.

Результаты исследования и их обсуждение

Хиогская рамочная программа действий, действовавшая в течение 10-ти лет, определила пять основных приоритетов деятельности по противодействию рискам бедствий, на основе которых впоследствии формировались механизмы управления рисками природного и техногенного характера. В таблице представлен анализ реализации этих приоритетов применительно к рискам бедствий радиологического/радиоэкологического характера в Республике Беларусь.

Основные приоритеты Хиогской рамочной программы действий и реализация в Республике Беларусь в сфере ОРБ

Main priorities of the Hyogo Framework for Action and implementation in the Republic of Belarus in the field of radiation safety

	Приоритет ХПД	Общие подходы для формирования механизмов управления рисками	Реализация в Республике Беларусь
1	Обеспечение приоритетной роли снижения риска бедствий	Деятельность на национальном и местном уровнях с развитием и совершенствованием институциональной базой для реализации	Формирование и совершенствование национальной правовой и технической правовой базы в сфере защиты от чрезвычайных ситуаций, здравоохранения, природоохранной деятельности, ядерного права и др.
2	Определение, оценка и мониторинг риска бедствий и усиление раннего оповещения	Выявление и определение приоритетных источников рисков, ранжирование рисков, мониторинг рисков, усиление системы раннего оповещения	Создание национальных систем мониторинга чрезвычайных ситуаций, НСМОС, санитарно-гигиенического мониторинга, включение в мировые и европейские системы мониторинга и передачи данных, формирование государственной системы реагирования на чрезвычайные ситуации природного и техногенного характера с созданием системы раннего оповещения, в том числе, с использованием АСПК/АСКРО
3	Использование знаний, инноваций и образования для создания культуры безопасности и устойчивости на всех уровнях	Формирование человеческого потенциала для обеспечения радиационной безопасности человека и окружающей среды, развитие научных исследований в сфере ОРБ, разработка и актуализация учебных программ в сфере подготовки кадров, в том числе повышения квалификации и дополнительного образования для взрослых, внедрение в практику основ культуры безопасности	Формирование и реализация государственных образовательных программ в сфере подготовки кадров для ядерной отрасли, ОРБ и научной сферы. Формирование и реализация государственных научных/научно-практических и иных программ в ядерной отрасли и ОРБ, в том числе, для создания инноваций с использованием автоматических систем и АИ. Формирование и совершенствование системы раннего оповещения различных информационных групп с использованием ИТ-технологий Формирование взаимодействия экспертов технических и научных специалистов, лиц, занимающихся вопросами планирования и других заинтересованных сторон, в том числе СМИ. ИТ-платформы для сохранения ядерных знаний. Использование потенциала МАГАТЭ, в том числе через технические проекты или образовательный проект PGEC

³Хиогская рамочная программа действий на 2005–2015 годы [Электронный ресурс]. Создание потенциала противодействия бедствиям на уровне государств и общин. URL: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/hyogoframework.shtml (дата обращения: 17.05.2025).

⁴Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. [Электронный ресурс]. URL: https://www.unisdr.org/files/43291_russiansendaiframeworkfordisasterri.pdf (дата обращения: 17.05.2025).

Окончание табл. 1

Ending table 1

	Приоритет ХПД	Общие подходы для формирования механизмов управления рисками	Реализация в Республике Беларусь
4	Снижение исходных факторов риска	Оценка действующих и потенциальных рисков с использованием принципа обоснования деятельности, ранжирование рисков, выявление территорий повышенного риска, выявление факторов уязвимости с оценкой их синергетического эффекта	Оценка радиологических/радиоэкологических рисков на стадии планирования деятельности (например, ОВОС), прогнозирование возникновения рисков, их взаимодействия с факторами уязвимости физического, социального, экономического и экологического характера, ранжирование рисков, мониторинг чрезвычайных ситуаций и радиационный мониторинг окружающей среды
5	Усиление готовности к бедствиям для эффективного реагирования на всех уровнях	Организация эффективного реагирования на всех уровнях, включая проведение оценки риска и инвестирование в сферу развития	Реализация государственных программ по обеспечению радиационной безопасности в различных типах ситуаций облучения, в том числе в рамках ГСЧС, национальные, отраслевые и объектовые планы реагирования на ЧС, например, Внешний и внутренний План реагирования на аварийную ситуацию на Белорусской АЭС, противоаварийные тренировки на ОИАЭ и др. Поддержание сил и средств реагирования на ЧС на постоянной основе (материальные, финансовые и людские ресурсы)

Анализ приоритетов ХПД применительно к Республике Беларусь показывает, что в настоящее время страна реализует все пять приоритетов, при этом общие подходы для механизмов управления рисками представлены в отдельных реализованных мероприятиях, например, сформированная нормативная правовая и нормативная правовая техническая база или Внешний и внутренний План реагирования на аварийную ситуацию на Белорусской АЭС.

Следует обратить внимание, что ранее Республика Беларусь стала участницей трех международных конвенций и одного договора, направленных на обеспечение ядерной и радиационной безопасности и способствующих выполнению приоритетов ХПД:

Конвенция об оперативном оповещении о ядерной аварии и Конвенция о помощи в случае ядерной аварии или радиационной ситуации (ратифицированы Указом Президиума Верховного Совета Республики Беларусь № 1216-XI от 18 декабря 1986 г.).

Конвенция о физической защите ядерного материала (ратифицирована Постановлением Президиума Верховного Совета № 2381-ХП от 14 июня 1993 г.).

Договор о нераспространении ядерного оружия (ратифицирован Постановлением Верховного Совета Республики Беларусь № 2166-XI от 04 февраля 1993 г.) и др.

Следует признать, что как на глобальном, так и национальном уровнях ХПД носит общий характер и необходимы дальнейшие усилия по организации эффективно действующей системы формирования и совершенствования потенциала противодействию опасностям и бедствиям, в том числе радиологического и радиоэкологического характера, с учетом изменяющегося состава угроз и рисков в сфере ОРБ.

Дальнейшим развитием Хиогской рамочной программы действий стала «Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. (далее – СРП)⁵.

За время реализации ХПД Республика Беларусь, как и другие страны, укрепила свой потенциал по управлению рисками бедствий в сфере ОРБ. При этом следует отметить, что на международном уровне эта деятельность продолжалась в тесном взаимодействии с МАГАТЭ, которое как часть ООН, последовательно включала в практику основные принципы управления бедствиями, особенно в части оценки радиологических/радиоэкологических рисков, раннего оповещения, внедрения инноваций и принципов культуры безопасности, сохранения ядерных знаний, повышения готовности к аварийным ситуациям на ОИАЭ.

⁵Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. [Электронный ресурс]. URL: https://www.unisdr.org/files/43291_russiansendaiframeworkfordisasterri.pdf (дата обращения: 17.05.2025).

Однако результаты деятельности по реализации ХПД приводят к выводу, что наиболее эффективным является системное внедрение превентивного подхода, что означает повышение роли прогнозирования риска бедствий для последующего планирования защитных мероприятий.

За счет систематической работы по мониторингу и ранжированию многообразных действующих и потенциальных рисков такой подход позволяет фокусировать усилия по укреплению потенциала противодействия бедствиям на наиболее значимых рисках и угрозах, что повышает его действенность и эффективность.

Отметим, что СРП вводит новые подходы по классификации и оценке бедствий: мелкомасштабные и крупномасштабные, регулярные и нерегулярные, внезапные и замедленные, которые, например, играли значительную роль в формировании причин/рисков возникновения катастрофы на Чернобыльской АЭС и имеют определение «ползучие» катастрофы, обусловленные «организационными» рисками [6; 7].

Республика Беларусь, которая сталкивается со специфическими трудностями в виде радиологических и радиоэкологических последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС, на протяжении длительного периода имеет научную, техническую и гуманитарную поддержку в рамках международных конвенций и двух- и многосторонних договоров.

В целом, СРП определяет семь глобальных целевых задач, две из которых непосредственно затрагивают сферу обеспечения радиационной защиты и безопасности⁶.

Так, для реализации глобальной задачи (d) СРП, которая предусматривает к 2030 г. значительное уменьшение ущерба, причиняемого важнейшим объектам инфраструктуры, а также уменьшение ущерба в виде нарушения работы критической инфраструктуры, включая медицинские учреждения, необходимы существенные усилия по укреплению потенциала противодействия бедствиям.

В Республике Беларусь сфере ОРБ укрепление потенциала включает формирование институциональной базы в сфере государственного управления, здравоохранения, науки и образования в виде нормативной и нормативной технической базы, развитие способности противодействия на местном и региональном уровнях, поддержание критической инфраструктуры, формирование сил и средств реагирования материальных, финансовых и людских и иных резервов в виде государственной системы реагирования на чрезвычайные ситуации и иных государственных программ, что реализуется в рамках формирования механизмов управления рисками (табл.).

Для реализации глобальной задачи (g) СРП к 2030 г. необходимо значительно улучшить ситуацию с наличием систем раннего оповещения, охватывающих разные виды угроз, и расширить доступ заинтересованных информационных групп, в первую очередь, населения, к информации и оценкам относительно риска бедствий.

В настоящее время в Республике Беларусь созданы и успешно функционируют автоматические системы раннего выявления и оповещения о радиоактивном загрязнении окружающей среды в 100 км зонах Чернобыльской, Игналинской, Ровенской и Смоленской АЭС, а также в зоне наблюдения Белорусской АЭС. Информация присутствует общем доступе в режиме on-line с использованием современных коммуникативных IT-технологий [3; 4; 8].

Однако в Республике Беларусь отсутствует удовлетворительное практическое разрешение проблемы оценки и ранжирования рисков в сфере ОРБ, которые бы обеспечили выполнение глобальной задачи (g) СРП в части научно-обоснованных оценок в условиях меняющегося состава угроз и рисков. В настоящее время разработана и представлена методология оценки и ранжирования рисков в сфере ОРБ применительно к условиям, однако она должна выполняться на системной основе [3; 4].

К большим достоинствам СРП следует отнести то обстоятельство, что впервые были разработаны и предложены для использования в общественной практике экономические аспекты и руководящие принципы управления рисками бедствий, которые имеют деление на международный, национальный и местный уровни. Кроме того, СРП предложила общие подходы к организации деятельности в сфере снижения рисков бедствий, которые далее представлены на рисунке в виде общего алгоритма действий по управлению рисками в сфере ОРБ в Республике Беларусь.

СРП предлагает четыре основных приоритетных направления деятельности по управлению рисками. Проведем анализ этих направлений применительно к практике обеспечения радиационной защиты и безопасности в Республике Беларусь, принимая положения СРП в качестве международных рекомендаций и рассматривая практику ОРБ на национальном, региональном и объектовом уровнях. Отметим, что содержательная часть приоритетов СРП между собой весьма близка, поэтому и результаты анализа по отдельным приоритетам будут дополнять друг друга.

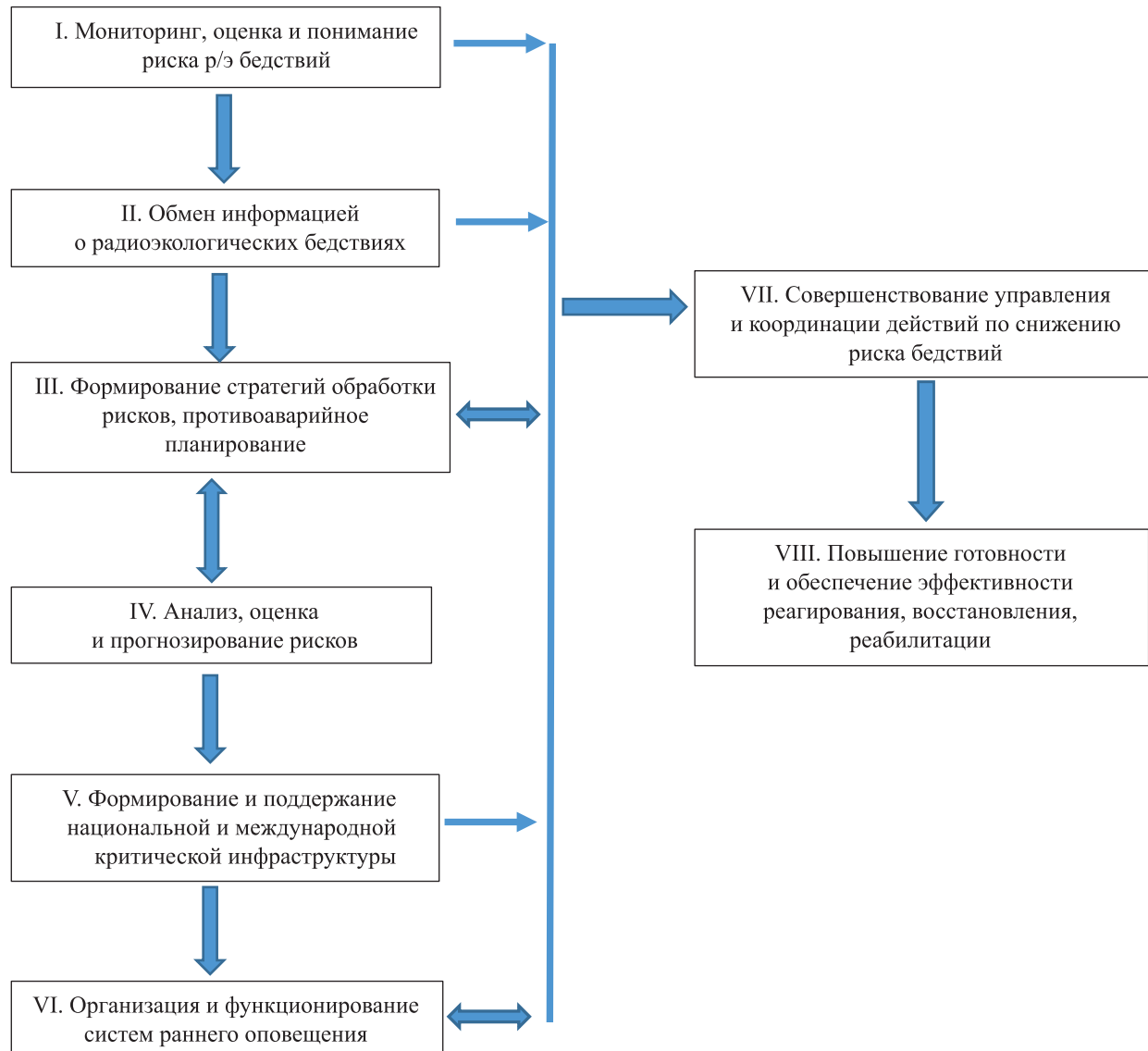
⁶ Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. [Электронный ресурс]. URL: https://www.unisdr.org/files/43291_russiansendaiframeworkfordisasterri.pdf (дата обращения: 17.05.2025).

Приоритет 1. Понимание риска бедствий (блоки I и IV Алгоритма)

Для эффективного противодействия бедствиям необходимо обеспечить оценку угроз и рисков в сфере ОРБ на постоянной основе с оценкой уязвимости объектов защиты до наступления событий и предотвращения бедствий или смягчения их последствий через разработку и реализацию надлежащих мер.

Формирование и реализация такого подхода в Республике Беларусь позволит обеспечить социально-приемлемый уровень ОРБ в различных условиях/типах ситуаций облучения на средне- и долгосрочную перспективу.

Приоритетное направление 2. Совершенствование организационно-правовых рамок управления риском бедствий (блоки II, III и VII Алгоритма)



Алгоритм действий по управлению рисками в сфере ОРБ в Республике Беларусь

Algorithm of actions for risk management in the field of radiation safety in the Republic of Belarus

Огромное значение для эффективного и действенного управления рисками в сфере ОРБ имеет организационно-правовая основа деятельности по снижению рисков бедствий на национальном, региональном и глобальном уровнях^{7, 8}.

⁷Закон Республики Беларусь от 26 мая 2012 г. № 385-З О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС [Электронный ресурс]. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=h11200385> (дата обращения: 24.04.2025).

⁸Закон Республики Беларусь от 6 января 2009 г. № 9-З О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий [Электронный ресурс]. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Минск. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H10900009> (дата обращения: 24.04.2025).

В Республике Беларусь разработаны и действуют необходимые стратегии противодействия рискам на национальном уровне, включающие конкретные планы и мероприятия, например, Внешний и внутренний аварийный для Белорусской АЭС или «Стратегия обращения с радиоактивными отходами в Республике Беларусь»⁹, определяющие компетенции отдельных органов государственного управления в сфере ОРБ и их координация на уровне отдельных секторов экономики и между секторами, а также участие соответствующих заинтересованных сторон – субъектов экономики.

Совершенствование организационно-правовых рамок деятельности по снижению радиологических и радиоэкологических рисков в части предотвращения, смягчения и минимизации последствий, обеспечения готовности, реагирования, восстановления и реабилитации имеет важное значение и способствует развитию сотрудничества и взаимодействия между различными механизмами и институтами в контексте осуществления положений документов, касающихся снижения риска бедствий для обеспечения устойчивого развития. Такая задача должна иметь соответствующее научное сопровождение и реализовываться в рамках государственных, отраслевых и местных программ.

Приоритетное направление 3. Инвестиции в меры по снижению риска бедствий в целях укрепления потенциала противодействия (блоки V и VI Алгоритма)

Для укрепления потенциала противодействия радиоэкологическим рискам для обеспечения радиационной защиты и безопасности человека (население и персонал) в экономической, социальной, медицинской и культурной областях, их имущества и окружающей среды необходимы государственные инвестиции в предотвращение и снижение риска в виде:

- научно-практического обоснования деятельности в сфере использования ядерной энергии и противодействия сопровождающим эту деятельность рискам;
- формирования необходимых сил и средств аварийного реагирования.

Такие инвестиции эффективны с точки зрения оптимизации затрат, играют важную роль в спасении жизни людей, предотвращении и сокращении потерь и успешном восстановлении и реабилитации объектов экономики и окружающей среды. Использование современных инновационных технологий способствует появлению новых «точек роста» в смежных отраслях экономики, науки и образования, обеспечивает более высокий уровень защиты и безопасности, способствует созданию новых рабочих мест и при оптимальном использовании доступных финансовых и трудовых ресурсов [8]. Важно, что инвестирование в формирование научно-технического потенциала для внедрения современных IT и AI- технологий, позволяет совершенствовать системы раннего оповещения в рамках системы радиационного мониторинга, что, наряду с превентивным подходом, является одним из важнейших приоритетов противодействия бедствиям, в том числе радиоэкологическим.

Приоритетное направление 4. Повышение готовности к бедствиям для обеспечения эффективного реагирования и внедрение принципа «сделать лучше, чем было» в деятельность по восстановлению, реабилитации и реконструкции (блоки II, IV и VIII Алгоритма)

Неуклонное повышение риска бедствий, в том числе радиоэкологических, усиление уязвимости человека и объектов окружающей среды и экономики в сочетании с уроками, извлеченными из бедствий прошлых лет, указывает на необходимость продолжать укреплять деятельность по обеспечению готовности к бедствиям в рамках реагирования на них, принимать упреждающие меры в ожидании таких событий, объединять меры по снижению риска бедствий с мерами по подготовке к реагированию и обеспечивать наличие потенциала для эффективного реагирования и восстановления на всех уровнях.

Практическая деятельность на примере Республики Беларусь по минимизации последствий радиоэкологического бедствия (катастрофы на Чернобыльской АЭС) демонстрирует, что этап восстановления, реабилитации и реконструкции имеет решающее значение для осуществления принципа «сделать лучше, чем было», в том числе посредством объединения мер по снижению риска бедствий с мерами по дальнейшему социально-экономическому развитию. Таким примером может служить Государственные программы по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2021–2025 годы¹⁰, которые предусматривают опережающее социально-экономического развития территорий, пострадавших после катастрофы на Чернобыльской АЭС, предусматривают строительство систем централизованного водоснабжения и газификацию сельских населенных пунктов, расширение сети квалифицированного медицинского обслуживания, меры по повышению производительности в сельском хозяйстве, которые призваны обеспечить приемлемый уровень радиационной защиты и безопасности, а с другой стороны,

⁹Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 22 марта 2018 г. n 211 Об утверждении плана защитных мероприятий при радиационной аварии на белорусской атомной электростанции (внешнего аварийного плана) [Электронный ресурс]. URL: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/6b5/sovmin_211_20180322.pdf (дата обращения: 24.04.2025).

¹⁰Государственная программа по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Минск. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100159> (дата обращения: 24.04.2025).

решают социально-бытовые проблемы населения и повышают социальную приемлемость существующих радиологических и радиоэкологических рисков¹¹.

Следует отметить, что, используя подход «снизу – вверх», предпочтительной представляется стратегия постоянной готовности к противодействию каждому бедствию до возникновения самого бедствия. Однако в условиях неопределенности, при отсутствии выделенных приоритетных источников бедствий с учетом их потенциального экономического и социального ущерба, способность противодействия бедствиям резко уменьшается и, соответственно, многочисленные разрозненные меры и недостаточные ресурсы не позволяют обеспечить ОРБ по всей стране, но в состоянии решить проблему на объектовом, локальном или отраслевом уровне.

Для решения проблем на национальном уровне необходимо сочетание подходов «сверху – вниз» и «снизу – вверх», что позволяет выделить критические элементы общей системы противодействия рискам в части:

- формирования научно обоснованных оценок рисков возникновения бедствий с ранжированием их по степени риска (**RR**) с учетом потенциального ущерба с заданной периодичностью;
- эффективно действующей системы наблюдений и прогноза – систем мониторинга, включая системы раннего оповещения.

СРП особое внимание уделяет деятельности различных сторон, которые являются участниками событий как действующие силы по изучению природы бедствий, научной поддержке мероприятий по предотвращению и минимизации / ликвидации последствий бедствий, а также информационному обеспечению безопасности.

В этом контексте роль заинтересованных сторон в обеспечении радиационной защиты и безопасности может рассматриваться в следующих аспектах: научное и информационное сопровождение.

В Республике Беларусь научное сопровождение такой деятельности возложено на академические, научные и исследовательские организации, например, Институт радиобиологии НАН Беларуси, Республиканский центр по гидрометеорологии, мониторингу и радиационному контролю, Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности, Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, иные организации научно-технической поддержки в сфере ядерной и радиационной безопасности¹².

Эти организации взаимодействуют между собой для предоставления государственным регуляторам в сфере ядерной и радиационной безопасности (министерства Республики Беларусь по чрезвычайным ситуациям, здравоохранения и природных ресурсов и охраны окружающей среды) текущих и прогнозных оценок состояния безопасности, в том числе окружающей среды, основанных на мониторинге факторов формирования, возникновения и проявления радиологических и радиоэкологических рисков.

Согласно СРП, для обеспечения эффективности таких оценок необходимо применять сценарные подходы для прогнозирования возникновения рисков, включая назревающие риски бедствий в среднесрочной и долгосрочной перспективе, в различных типах ситуаций облучения для последующего противоаварийного планирования с обязательным условием рационального использования доступных ресурсов.

Понятно, что реализация этих задач невозможна без создания эффективной системы управления рисками, в которую в качестве необходимого условия/компонента входят системы мониторинга, действующие в Республике Беларусь – мониторинг чрезвычайных ситуаций, радиационный мониторинг окружающей среды в составе НСМО, радиационно-гигиенический мониторинг, а также системы раннего оповещения.

Учитывая важность социальных последствий радиологических и радиоэкологических бедствий, особое значение приобретает деятельность в сфере информационного обеспечения. Она может быть разделена на две категории: с одной стороны, сбор, обработка, в том числе прогнозирование, анализ, хранение и передача информации о состоянии и загрязнении окружающей среды, с другой – представление оценок состояния и прогнозов радиационной обстановки различным информационным группам [8; 9]. Первая часть реализуется на уровне функционирования систем мониторинга и решается научно-техническими способами, например, внедрение автоматизированных или автоматических систем раннего оповещения, вторая часть решает социальные задачи, однако основывается на результатах систем мониторинга и воплощается помощью современных коммуникационных технологий.

¹¹ Государственная программа по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2021–2025 годы [Электронный ресурс]. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Минск. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100159> (дата обращения: 24.04.2025).

¹² Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 02.12.2016 № 991 «Об оказании научно-технической поддержки Министерству по чрезвычайным ситуациям в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности» [Электронный ресурс]. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/http://pda.government.gov.by/upload/docs/file6f7e813daae7896c.pdf> (дата обращения: 24.04.2025).

В этом контексте средства массовой информации играют значительную роль на местном, национальном, региональном и глобальном уровнях, содействуют более глубокому осознанию и пониманию общественностью этих проблем и распространяют достоверную неконфиденциальную информацию о рисках, угрозах и радиологических и радиоэкологических бедствиях и их последствиях, а также о мерах для ОРБ.

При этом важно, что для каждой информационной группы форма представления должна иметь свои особенности, как это показано в [8]. Такая деятельность эффективна в интересах снижения риска бедствий, принятия защитных мер по спасению жизни людей; формирования культуры безопасности и предотвращения или минимизации последствий радиологических или радиоэкологических бедствий, например, своевременное проведение йодной профилактики в случае радиационной аварии на АЭС.

Отметим, что для информирования населения через СМИ широко используется Международная шкала ядерных событий (International Nuclear Event Scale – INES), которая разработана МАГАТЭ для оценки событий, связанных с аварийными радиационными выбросами в окружающую среду на атомных станциях и иных установках, промышленного, научного и других видов использования ядерной энергии в мирных целях, которые могут привести или привели к радиологическим/радиоэкологическим бедствиям.

Заключение

Для решения крупной комплексной государственной задачи противостояния радиоэкологическим бедствиям и обеспечения радиационной безопасности населения и окружающей среды на социально-приемлемом уровне необходимо иметь научно обоснованные подходы к осуществлению деятельности в части разработки стратегий, программ и руководящих документов для выявления источников радиоэкологических рисков в целях последующего формирования и совершенствования национальной правовой и технической правовой базы, а также сил и средств аварийного реагирования.

Источники радиологических/радиоэкологических рисков и бедствий в течение последних десятилетий играют весьма существенную роль, а если учесть глобальные последствия испытаний и использования ядерного оружия, а также ядерных катастроф на Чернобыльской и Фукусимской АЭС, угроз трансграничного радиоактивного загрязнения вследствие аварий на ОИАЭ и в результате ядерного терроризма, то риски в сфере ОРБ многократно возрастают.

Анализ результатов деятельности по реализации ХПД приводят к выводу, что для обеспечения радиационной безопасности Республики Беларусь в настоящее время наиболее эффективным является системное внедрение превентивного подхода противостояния радиоэкологическим бедствиям природного и техногенного характера, что означает повышение роли их прогнозирования для последующего планирования защитных мероприятий.

Для эффективной деятельности в сфере обеспечения радиационной защиты и безопасности человека и окружающей среды необходимо иметь комплекс мер для эффективного противодействия радиоэкологическим бедствиям, который обеспечен необходимыми ресурсами в средне- и долгосрочной перспективе, иными словами, страна должна формировать и поддерживать на постоянной основе потенциал противодействия бедствиям, в том числе радиологическим/радиоэкологическим, который включает в себя механизмы управления радиологическими/радиоэкологическими рисками.

Особенностью применения рекомендаций Хиогской и Сендайской рамочных программ противодействия бедствиям радиоэкологического и радиоэкологического характера в Республике Беларусь является точечная реализация руководящих принципов и экономических аспектов управления деятельностью применительно к конкретным бедствиям, которые привели к ущербу в социуме, в том числе в экономике и окружающей среде.

В долгосрочной перспективе на основе разработанного Алгоритма действий по управлению рисками в сфере ОРБ в Республике Беларусь необходимо на постоянной основе поддерживать функционирование следующих механизмов управления радиологическими/радиоэкологическими рисками:

а) осуществлять мониторинг радиологических и радиоэкологических рисков с последующей оценкой и ранжированием по степени риска, в том числе мониторинг природных и техногенных факторов уязвимости с использованием НСМОС, систем мониторинга чрезвычайных ситуаций и санитарно-гигиенического мониторинга;

б) обеспечить эффективное функционирование системы радиационного мониторинга (наблюдения, оценка и прогноз радиационной обстановки, картирование), в том числе с использованием ИТ- и ИА-технологий;

в) обеспечить функционирование системы раннего оповещения о радиологических угрозах, рисках и бедствиях, в том числе с использованием ИТ- и ИА-технологий;

г) обеспечить научное и информационное сопровождение деятельности по управлению рисками и обеспечению радиационной безопасности.

Для достижения указанных целей необходимо дальнейшее совершенствование и повышение эффективности системы радиационного мониторинга и прогноза радиационной обстановки, а также систем раннего оповещения, учитывая все известные действующие и потенциальные угрозы.

Библиографические ссылки

1. Алексахин РМ, Булдаков ЛА, Губанов ВА и др. *Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры*. Москва: ИздАТ; 2001. 752 с.
2. Международное агентство по атомной энергии. International Atomic Energy Agency (IAEA) [Интернет, процитировано 24 апреля 2025]. URL: <https://www.iaea.org>.
3. Герменчук МГ, Цыбулько НН. Основные механизмы управления рисками в сфере радиационной безопасности и мониторинг окружающей среды. *Вестник Брестского государственного технического университета. Геоэкология*. 2024;1(133):160–168. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-133-1-160-168>.
4. Герменчук МГ, Цыбулько НН, Шалькевич ПК, Дашкевич ТВ. Динамика состава радиационной обстановки и ранжирование радиоэкологических рисков в Республике Беларусь. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2024;2(134):136–145. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-134-2-136-145>.
5. Germenchuk MG. Problems of risk management in the radiation safety in the republic of Belarus in different situations. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2024;3(135):109–116. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-135-3-109-116>.
6. Авдоткин ВП, Дзыбов ММ, Самсонов КП. *Оценка ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера*. Москва: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ); 2012. 468 с.
7. Титович АА. *Менеджмент риска и страхования*. 2-е издание. Минск: Вышэйшая школа; 2011. 289 с.
8. Герменчук МГ. *Радиационный мониторинг окружающей среды*. Минск: Вышэйшая школа; 2021. 278 с.
9. Дашкевич ТВ, Герменчук МГ. Научно-методическое обоснование оценки радиоактивного загрязнения окружающей среды. *Экологический вестник*. 2012;1:32–38.

References

1. Aleksahin RM, Buldakov LA, Gubanov VA, et al. *Kрупnye radiacionnye avarii: posledstviya i zashchitnye mery* [Major radiation accidents: consequences and protective measures]. Moscow: IzdAT; 2001. 752 p. Russian.
2. Mezhdunarodnoe agentstvo po atomnoj energii. International Atomic Energy Agency (IAEA) [Internet, cited 2025 April 24]. Available from: <https://www.iaea.org>.
3. Germenchuk MG, Tsybulko NN. *Osnovnye mekhanizmy upravleniya riskami v sfere radiacionnoj bezopasnosti i monitoring okruzhayushchej sredy* [Scientific and methodological substantiation of the assessment of radioactive contamination of the environment monitoring]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Geoekologiya*. 2024;1(133):160–168. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-133-1-160-168>. Russian.
4. Germenchuk MG, Tsybulko NN, Shalkevich PK, Dashkevich TV. *Dinamika sostava radiacionnoj obstanovki i ranzhirovanie radioekologicheskikh riskov v Respublike Belarus* [Dynamics of the composition of the radiation situation and ranking of radioecological risks in the Republic of Belarus]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2024;2(134):136–145. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-134-2-136-145>. Russian.
5. Germenchuk MG. Problems of risk management in the radiation safety in the republic of Belarus in different situations. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2024;3(135):109–116. <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2024-135-3-109-116>. English.
6. Avdot'in VP, Dzybov MM, Samsonov KP. *Ocenka ushcherba ot chrezvychajnykh situacij prirodnogo i tekhnogennoho haraktera* [Assessment of damage from natural and man-made emergencies]. Moscow: FGBU VNII GOCHS (FC); 2012. 468 p. Russian.
7. Titovich AA. *Menedzhment riska i strahovaniya. 2-e izdanie* [Risk and Insurance Management]. Minsk: Vyshejschaya shkola; 2011. 289 p. Russian.
8. Germenchuk MG. *Radiacionnyj monitoring okruzhayushchej sredy* [Radiation monitoring of the environment]. Minsk: Vyshejschaya shkola; 2021. 278 p. Russian.
9. Dashkevich TV, Germenchuk MG. *Nauchno-metodicheskoe obosnovanie ocenki radioaktivnogo zagryazneniya okruzhayushchej sredy* [Scientific and methodological substantiation of the assessment of radioactive contamination of the environment]. *Ekologicheskij vestnik*. 2012;1:32–38. Russian.

Статья поступила в редакцию 20.05.2025.
Received by editorial board 20.05.2025.

УДК 630*114.351(630*176.322.6):539.163(546.36+546.42)

ЗАПАСЫ ^{137}Cs И ^{90}Sr В ЛЕСНЫХ ПОДСТИЛКАХ ДУБОВЫХ ЛЕСОВ БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

А. В. УГЛЯНЕЦ¹⁾, Д. К. ГАРБАРУК¹⁾

¹⁾Полесский государственный радиационно-экологический заповедник,
ул. Терешковой, 7, 247618, г. Хойники, Беларусь

Приведены результаты изучения содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных подстилках дубовых лесов ближней зоны Чернобыльской атомной электростанции в границах заповедной зоны Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ) Беларуси. В 2021 г. перед началом листопада суммарный запас ^{137}Cs в подстилках дубовой формации этой территории площадью 49,21 км² оценивался в $(1,65\text{--}2,02)\times 10^{12}$ Бк, ^{90}Sr – в $(0,51\text{--}0,80)\times 10^{12}$ Бк. Удельный вес накопленного в них ^{137}Cs составлял 40,5–45,1 % от общего запаса радионуклида в мортмассе лесных подстилок, ассоциированного с органическим веществом фитоценозов, ^{90}Sr – 33,4–50,4 %. Содержание радионуклидов в лесных подстилках дубрав пространственно крайне неоднородно. Размах колебания частных значений удельной активности ^{137}Cs в них достигал 19,4 раз, ^{90}Sr – 96, запаса ^{137}Cs – 30,5, ^{90}Sr – 146 раз. Удельная активность и запасы обоих радионуклидов в подстилках повышались в типологическом ряду дубрава прируслово-пойменная (*Quercetum sublveto-fluvialis*) – дубрава кисличная (*Q. oxalidosum*) – дубрава снытевая (*Q. aegopodiosum*) – дубрава злаково-пойменная (*Q. graminoso-fluvialis*). Пространственные величины запаса ^{137}Cs в отдельных типах леса колебались в пределах 5,5–11,1 раз, ^{90}Sr – 2,7–69,5 раз. Запасы ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных подстилках дубрав связаны с их удельной активностью в верхнем 20-сантиметровом слое почвы, расстоянием до места выброса радионуклидов, условиями местопроизрастания, продуктивностью древостоев, запасы ^{137}Cs – с толщиной и запасами мортмассы лесных подстилок, запасы ^{90}Sr – с долей участия в составе древостоев дуба примеси других пород. Существенное влияние на удержание радионуклидов лесными подстилками оказывают погодно-климатические факторы.

Ключевые слова: Чернобыльская атомная электростанция; ближняя зона; дубрава; лесная подстилка; ^{137}Cs ; ^{90}Sr ; удельная активность; запас радионуклида.

Благодарность. Исследования выполнены в соответствии с Программой совместной деятельности России и Беларуси в рамках Союзного государства по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС в части ответственности белорусской стороны.

CURRENT STOCKS OF ^{137}Cs AND ^{90}Sr IN FOREST LITTERS OF OAK FORESTS IN THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT NEAR ZONE

A. V. UGLYANETS^a, D. K. GARBARUK^a

^aPolesie State Radiation-Ecological Reserve,
7 Tserashkovay Street, Khoyniki 247618, Belarus
Corresponding author: D. K. Garbaruk (dima.garbaruk.77@mail.ru)

Образец цитирования:

Углянец АВ, Гарбарук ДК. Запасы ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных подстилках дубовых лесов ближней зоны Чернобыльской АЭС. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2025;2:52–67.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-52-67>

For citation:

Uglyanets AV, Garbaruk DK. Current stocks of ^{137}Cs and ^{90}Sr in forest litters of oak forests in the Chernobyl nuclear power plant near zone. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2025;2:52–67. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-52-67>

Авторы:

Анатолий Владимирович Углянец – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; ведущий научный сотрудник отдела экологии растительных комплексов.
Дмитрий Константинович Гарбарук – заведующий отделом экологии растительных комплексов.

Authors:

Anatoliy V. Uglyanets, PhD (agriculture), docent; leading researcher at the department of ecology of vegetative complexes. uhlianets@mail.ru
Dmitriy K. Garbaruk, head of the department of ecology of vegetative complexes.
dima.garbaruk.77@mail.ru

The results of the study of ^{137}Cs and ^{90}Sr content in forest litter of oak forests of the near zone of the Chernobyl nuclear power plant within the boundaries of the protected area of the Polesky State Radiation and Ecological Reserve of Belarus are presented. In 2021, before the beginning of leaf fall, the total ^{137}Cs stock in the litter of the oak formation of this 49.21 km² area was estimated at $(1.65\text{--}2.02)\times 10^{12}$ Bq, ^{90}Sr – at $(0.51\text{--}0.80)\times 10^{12}$ Bq. The specific weight of ^{137}Cs accumulated in them amounted to 40.5–45.1% of the total radionuclide stock in the mortmass of forest litter associated with organic matter of phytocenoses, ^{90}Sr – 33.4–50.4%. The radionuclide content in forest litter of oak forests is spatially extremely heterogeneous. The range of fluctuations of specific activity of ^{137}Cs in them reached 19.4 times, ^{90}Sr – 96 times, ^{137}Cs stock – 30.5 times, ^{90}Sr – 146 times. Specific activity and stocks of both radionuclides in the litter increased in the typological series *Quercetum sublveto-fluvialis* – *Quercetum oxalidosum* – *Quercetum aegopodiosum* – *Quercetum graminoso-fluvialis*. The spatial values of ^{137}Cs stock in individual forest types varied within 5.5–11.1 times, ^{90}Sr – 2.7–69.5 times. ^{137}Cs and ^{90}Sr stocks in forest litter of oak forests are related to their specific activity in the upper 20-cm layer of soil, distance to the radionuclide release site, growing conditions, stand productivity; ^{137}Cs stocks – to the thickness and stocks of the mortmass of forest litter; ^{90}Sr stocks – to the share of other species admixture in the composition of oak stands. Weather-climatic factors have a significant influence on radionuclide retention by forest litter.

Keywords: Chernobyl Nuclear Power Plant; near zone; oak forest; forest litter; ^{137}Cs ; ^{90}Sr ; specific activity; stock of radionuclide.

Acknowledgements. This study was carried out as part of the Programme for Cooperation between Belarus and the Russian Federation for protecting the population and rehabilitating territories affected by the Chernobyl NPP catastrophe within the responsibility of the Republic of Belarus.

Введение

После аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) на примыкающей к ней наиболее загрязненной радиоактивными веществами территории создана зона отчуждения (ЗО), а в ее границах в 1988 г. – Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (заповедник), в котором выделена заповедная зона, расположенная выше изолинии плотности поверхностного загрязнения почвы (P_s) ^{137}Cs 1480 кБк/м². Она несколько шире 30-километровой зоны вокруг ЧАЭС и условно является территорией «ближней» зоны радиоактивных выпадений.

Высокая лесистость примыкающей к ЧАЭС местности обеспечила первичное осаждение большого количества переносимых воздушными массами радиоактивных веществ в результате их фильтрации наземной фитомассой лесных насаждений [1; 2]. В итоге, на территории заповедника осело до 30 % ^{137}Cs от выпавшего в Беларуси и 70 % ^{90}Sr ¹. Лесные экосистемы стали барьером дальнейшего распространения радиоактивных веществ, закрепляя их в биологическом круговороте, перераспределяя по своим компонентам, создавая тем самым «почвенно-растительный антинуклидный барьер» для их миграции [3]. Особую роль в этом процессе играют лесные подстилки (ЛП), представляющие важное звено в биологическом круговороте радионуклидов, удерживающие их в себе, замедляя вертикальное перемещение [1–4].

В первые месяцы после аварии на ЧАЭС почти все выпавшие в лесах радиоактивные вещества были сосредоточены на поверхности растений [1; 2]. Затем основная их часть перешла в ЛП, которая уже в августе 1986 г. в смешанных дубовых насаждениях 30-километровой зоны ЧАЭС содержала 80,5–86,4 % запаса радионуклидов от общего их количества в биогеоценозе [1]. По мере миграции радионуклидов в минеральную часть почвы, вовлечения в биологический круговорот и перераспределения по элементам фитоценозов их содержание в ЛП сокращалось. В 1992 г. в 30-километровой зоне ЧАЭС Украины в них находилось 58,3–90,5 % ^{137}Cs от суммарной P_s , в 1995 г. – до 70 % от объема радиоактивных выпадений [1]. В конце 1980-х гг. в лесах белорусской части ЗО ЧАЭС ЛП удерживали 30–75 % радионуклидов от общего количества в почве, в начале 1990-х гг. – 10–60 % [2]. Во второй половине 2000-х гг. в подстилке березняка мшистого находилось 41,9 % ^{137}Cs и 12,4 % ^{90}Sr , березняка черничного – 7,0 % ^{137}Cs и 8,3 % ^{90}Sr от их общих запасов в наземной и надземной фитомассе [5]. К концу 2010-х гг. в ЛП сосняков на автоморфных и полугидроморфных почвах содержалось 38,5–52,0 % ^{137}Cs [6] и 22,9–37,1 % ^{90}Sr [7] от их количества в фитоценозах. Через 30 лет после аварии на ЧАЭС максимальная концентрация радионуклидов в березняках переместилась из ЛП в 0–5-сантиметровые минеральные слои почв². Через 35 лет после катастрофы здесь было сосредоточено уже более половины общего запаса ^{137}Cs в подстильно-почвенном комплексе насаждений всех

¹35 лет после Чернобыльской катастрофы: итоги и перспективы преодоления ее последствий: Национальный доклад Республики Беларусь. Минск: ИВЦ Минфина; 2020. 152 с.

²30 лет чернобыльской аварии: итоги и перспективы преодоления ее последствий. Национальный доклад Республики Беларусь. Минск: Институт радиологии; 2016. 116 с.

лесообразующих древесных пород [8]. В 2023 г. содержание ^{137}Cs в органогенных слоях лесных почв ближней зоны, включая дубраву, составляло 2,4–13,7 % от общего его количества, депонированного в почвенном профиле, ^{90}Sr – 1,1–11,1 % [9].

В 2019 г. в заповедной зоне Полесского заповедника в ЛП черноольшаников, характеризующихся наименьшими запасами радионуклидов [1; 2; 4; 8], содержалось 37,7 % ^{137}Cs и 31,4 % ^{90}Sr от их запасов, суммарно накопленных в ЛП, наземной и надземной фито- и мортмассе биогеоценозов [10]. Там же в ЛП дубрав в 2021 г. было сосредоточено 21,3 % ^{137}Cs и 24,2 % ^{90}Sr от их запасов в ЛП, ассоциированных с запасами в наземной и надземной фитомассе [11]. Отметим, что в прилегающем к Семипалатинскому испытательному полигону сосновом бору в комплексе «ЛП – верхний 5-см слой почвы» на долю подстилки приходилось 80 % запаса ^{137}Cs и 64 % ^{90}Sr даже через 70 лет после радиоактивных выпадений [12]. Приведенные данные свидетельствуют о том, что ЛП остаются одним из основных «депо» радиоактивных веществ в лесных биогеоценозах, а изучение содержания в них ^{137}Cs и ^{90}Sr на современном этапе последствий аварии на ЧАЭС является актуальным вопросом.

Уровни аккумуляции радионуклидов в ЛП определяют их толщина и запас, погодно-климатические условия, влагообеспеченность почв, микробиологическая деятельность, состав и возраст древостоя, характеристики нижних ярусов фитоценозов и ряд других факторов. Наиболее значимую роль в этом процессе играют древостой, дающий основное количество опада, и его породный состав, определяющий характер разлагаемой органики, а также режим увлажнения почвы, влияющий на активность микробиоты и скорость разложения подстилки [1; 2; 4; 8; 13; 14].

Значение лесообразующей древесной породы в накоплении радионуклидов ЛП подтверждают следующие данные. Через 8 лет после аварии подстилки сосняков в ЗО ЧАЭС содержали 77–91 % валового запаса ^{137}Cs и 14–22 % ^{90}Sr , березняков – 66–84 и 35–71 %, дубрав – 27–71 и 26–28 %, черноольшаников – 13–48 и 30–61 % соответственно [15]. Этот расклад не изменился и к 2020 г., когда удельный вес запаса ^{137}Cs в ЛП в 20-сантиметровом подстильно-почвенном комплексе уменьшался в том же ряду лесных формаций: сосняки (30,9 %) > березняки (22,8 %) > дубравы (12,4 %) > черноольшаники (5,9 %) [8]. Как видим, ЛП дубрав характеризуются более низкой способностью удержания радионуклидов в сравнении с подстилками других лесных формаций, уступая лишь черноольшаникам, приуроченным к полугидроморфным и гидроморфным почвам.

Дубравы в заповеднике занимают 7863 га, или 5,6 % лесопокрытой площади, в «ближней» зоне ЧАЭС – 4921 га, или 62,6 % площади формации. В экологической группе суходольных (условно плакорных) дубрав самыми распространенными являются кисличный (28,8 %) и снытевый (10,8 %) типы леса; в экологической группе пойменных дубрав – злаково-пойменный (10,7 %) и прируслово-пойменный (10,8 %). На них приходится 61,2 % всей площади дубрав белорусского сектора ЗО ЧАЭС.

Цель исследования – оценить запасы ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП дубрав белорусского сектора «ближней» зоны ЧАЭС по состоянию на 2021 г., установить влияние на них наиболее значимых экологических факторов.

Материалы и методы исследования

Объект исследований – ЛП в естественных дубравах ближней зоны белорусского сектора ЗО ЧАЭС выше изолинии P_s ^{137}Cs 40 Ки/км² (1480 кБк/м²) на 2009 г. [16].

Изучение содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП проводили до начала листопада (24.08.2021–7.09.2021 г.) на момент стабилизации их мощности [17] на 25 временных пробных площадях (ВПП), в том числе в дубравах кисличных (*Quercetum oxalidosum*) – на 8 ВПП, снытевых (*Q. aegopodiosum*) – на 7 ВПП, прируслово-пойменных (*Q. sublveto-fluvialis*) – на 5 ВПП и злаково-пойменных (*Q. graminoso-fluvialis*) – на 5 ВПП. Типологическая подборка объектов вполне репрезентативна дубовой лесной формации, о чем свидетельствует покрытие насаждениями этих типов леса 64,6 % площади дубрав в заповедной зоне.

Закладку ВПП проводили в соответствии с ТКП 498-2013 (02080) «Радиационный мониторинг лесного фонда. Закладка постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения» и описанными в источнике [18] методами. Таксацию древостоев и расчет таксационных показателей на ВПП выполнили с использованием справочников [19; 20]. Средние таксационные показатели древостоев и их диапазоны по типам дубрав приведены в табл. 1, детальные характеристики верхних ярусов – в работе [21].

На каждой ВПП в 12 точках отбирали образцы почвы с ЛП стандартным пробоотборником диаметром 4 см на глубину 20 см в соответствии с ТКП 499-2013 (02080). «Радиационный мониторинг лесного фонда. Обследование постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения», которые высушивали до воздушно-сухого состояния, определяли в них удельную активность (A_s) ^{137}Cs и ^{90}Sr на сцинтилляционном гамма-бета-спектрометре МКС-АТ1315 (Беларусь) и рассчитывали P_s этими радионуклидами. Показатели загрязнения ими почвы по типам леса приведены на рис. 1.

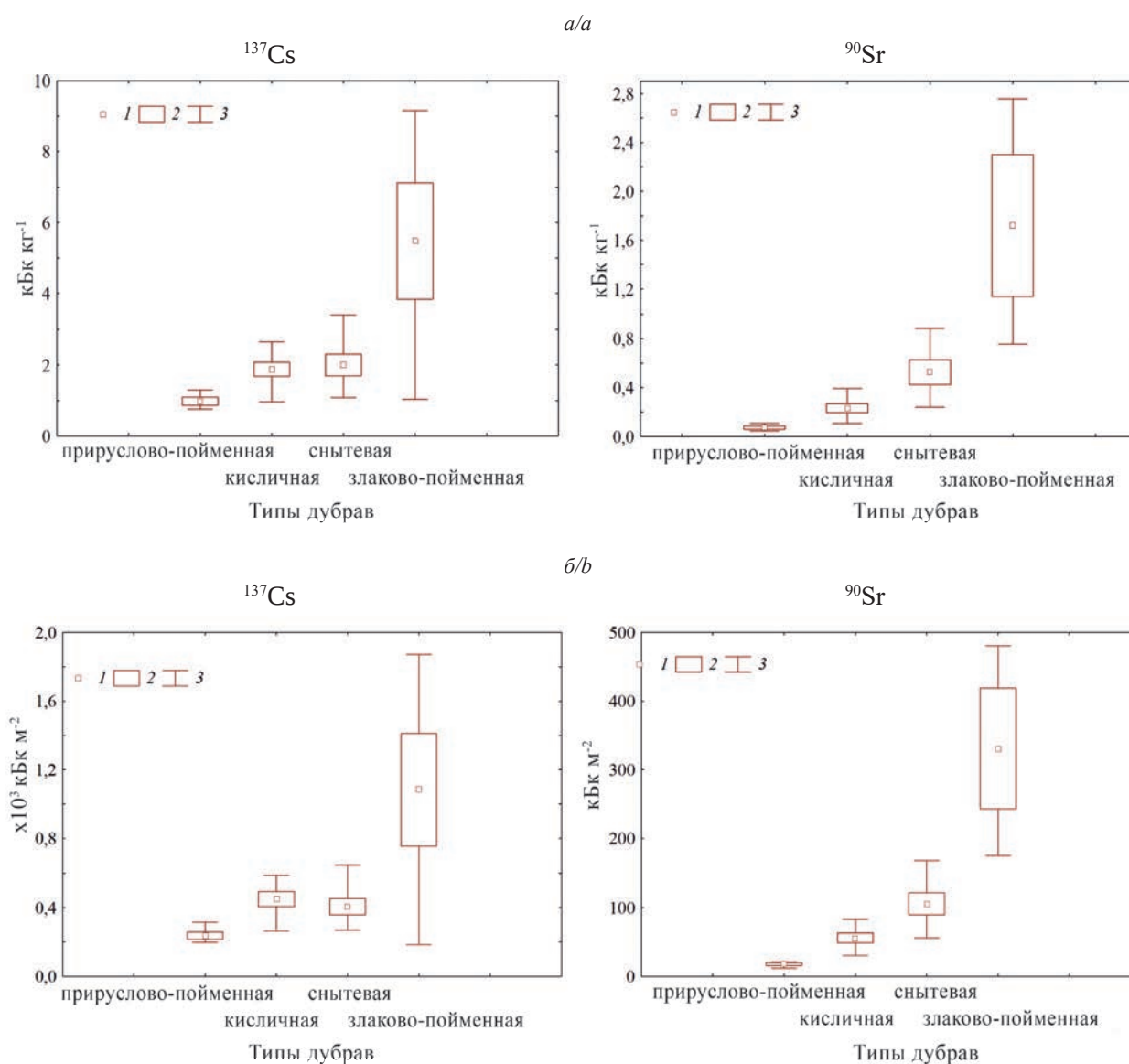


Рис. 1. Показатели загрязнения почвы радионуклидами по типам леса:
а – удельная активность, кБк/кг, б – плотность поверхностного загрязнения, кБк/м²

Fig. 1. Indicators of soil radionuclide contamination by forest types:
а – specific activity, kBq kg⁻¹, б – surface contamination density, kBq m⁻²

Таблица 1

Средние таксационные показатели древостоев дуба (числитель) и их диапазоны (знаменатель) по типам леса

Table 1

Average taxation indices of oak stands (numerator) and their ranges (denominator) by forest types

Тип леса / тип лесорастительных условий (ТЛУ)	Количество ВПП, шт.	Доля в составе, %	Возраст, лет	Средние		Класс бонитета	Густота, шт./га	Сумма площадей сечений, м²/га	Полнота	Запас, м³/га
				высота, м	диаметр, см					
дуба							общая			
Дубрава кисличная / D₂	8	<u>89</u> 68–100	<u>112</u> 80–130	<u>23,3</u> 20,8–27,4	<u>42,8</u> 31,6–58,9	<u>II,8</u> II–III	<u>254</u> 124–552	<u>24,2</u> 19,9–33,7	<u>0,7</u> 0,6–0,9	<u>260</u> 208–423
Дубрава снытевая / D₃	7	<u>59</u> 37–85	<u>101</u> 60–130	<u>22,1</u> 20,8–23,4	<u>42,9</u> 29,0–54,9	<u>II,6</u> I–III	<u>426</u> 128–637	<u>22,8</u> 14,1–27,6	<u>0,7</u> 0,7–0,9	<u>202</u> 133–246

Окончание табл. 1

Ending table 1

Тип леса / тип лесорастительных условий (ТЛУ)	Количество ВПП, шт.	Доля в составе, %	Возраст, лет	Средние		Класс бонитета	Густота, шт./га	Сумма площадей сечений, м²/га	Полнота	Запас, м³/га
				высота, м	диаметр, см					
				дуба						
Дубрава прируслово-пойменная / А _{2п} , В _{2п}	5	<u>92</u> 85–98	<u>72</u> 65–80	<u>12,7</u> 9,1–14,5	<u>31,3</u> 28,6–34,7	<u>IV,2</u> IV–V	<u>240</u> 157–363	<u>17,4</u> 12,1–21,6	<u>0,8</u> 0,5–1,1	<u>143</u> 121–162
Дубрава злаково-пойменная / С _{2п} , С _{3п}	5	<u>75</u> 62–98	<u>85</u> 60–130	<u>20,9</u> 17,5–25,8	<u>29,8</u> 21,8–36,9	<u>II,4</u> II–III	<u>443</u> 188–636	<u>23,9</u> 19,9–27,1	<u>0,8</u> 0,6–0,9	<u>223</u> 202–260

Дубравы прируслово-пойменные приурочены к наиболее повышенным элементам рельефа (прирусловые валы, высокие останцы надпойменных террас). Почвы в них (здесь и ниже по [22]) бедные аллювиальные иловато-песчаные. Дубравы кисличные покрывают плоские и слегка повышенные участки моренных равнин, подножья склонов водно-ледниковых возвышенностей, гряды и гривы надпойменных террас Припяти. Почвы под ними автоморфные супесчаные на песках или рыхлых супесях сменяемых рыхлыми песками или моренными суглинками с глубины до 1 м. Дубравы снытевые произрастают в понижениях моренных равнин, подножьях водно-ледниковых возвышенностей, склонах и пониженных частях грив надпойменных террас. Почвы полугидроморфные глееватые песчаные и супесчаные на связных и рыхлых песках, сменяемых песками рыхлыми или подстилаемые суглинками моренными с глубины до 1 м. Дубравы злаково-пойменные занимают плоские гривы, повышенные плоские участки поймы, как правило, затопливаемые паводковыми водами. Почвы аллювиальные дерново-глееватые и глеевые на песчаном и супесчаном аллювии. По классификации [23] ЛП в дубраве прируслово-пойменной относятся к деструктивному, в кисличной – преимущественно к ферментативному, в злаково-пойменной и снытевой – преимущественно к гумифицированному типам.

Образцы ЛП отбирали на 15 учетных площадках на каждой ВПП. Методы и результаты изучения характеристик ЛП в дубравах ЗО ЧАЭС изложены в работе [24]. Основные их параметры по типам леса приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние показатели характеристик лесных подстилок по типам леса

Table 2

Average forest litter characteristics by forest type

Показатель лесной подстилки	Дубрава			
	прируслово-пойменная	кисличная	снытевая	злаково-пойменная
Количество переменных	75	120	105	75
Толщина, см	1,7 ± 0,10	2,5 ± 0,09	2,6 ± 0,12	2,9 ± 0,14
Запас, кг/м²	1,6 ± 0,10	2,1 ± 0,10	2,7 ± 0,13	2,0 ± 0,10

Примечание. Точность определения толщины ЛП составила 3,7–5,8 %, запаса ЛП – 4,8–6,5 %.

Для определения концентрации радионуклидов в ЛП на каждой ВПП отбирали средние пробы ЛП из 15 смешанных образцов, делили их на 3 равные части и в каждой определяли $As^{137}Cs$ и ^{90}Sr на сцинтилляционном гамма-бета-спектрометре. Величины $As^{137}Cs$ и ^{90}Sr в ЛП на ВПП получали путем вычисления средних арифметических из трех измеренных частей пробы. На основе данных $As^{137}Cs$ и ^{90}Sr и запасов ЛП рассчитывали запас (Mr) каждого радионуклида в ЛП.

Обработку материалов производили при помощи стандартных пакетов прикладных программ *Microsoft Excel 2010* и *Statistica 6.1*.

Достоверность различий ($t_{\text{факт.}}$) для двух сравниваемых малых выборок ($n < 20$) рассчитывали по формуле:

$$t_{\text{факт.}} = (M_1 - M_2) \sqrt{\frac{1 - 2(n_1 + n_2)^{-1}}{\frac{\sigma_1^2}{n_2} + \frac{\sigma_2^2}{n_1}}},$$

где M – среднее значение выборки; σ – стандартное отклонение.

Результаты исследования и их обсуждение

Содержание радионуклидов в лесных подстилках дубрав. As ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП дубовых лесов варьирует в очень широких пределах. Размах колебаний частных значений As ^{137}Cs в ЛП в пределах типов леса составляет 3,4–8,6 раза, As ^{90}Sr – 2,2–85,6 раз (табл. 3). Общая изменчивость индивидуальных величин As ^{137}Cs в дубовой лесной формации достигает 19 раз и ^{90}Sr – 96 раз.

Таблица 3

Статистические показатели удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных подстилках, кБк/кг

Table 3

Statistical indicators of the ^{137}Cs and ^{90}Sr specific activity in forest litters, kBq kg⁻¹

Статистический показатель	Дубрава			
	прируслово-пойменная	кисличная	снытевая	злаково-пойменная
n	5	8	7	5
^{137}Cs				
min–max	2,77–9,44	7,06–30,58	4,39–25,00	6,22–53,84
Ci	0,97–7,94	9,79–23,57	9,78–22,39	6,43–56,51
$M \pm m$	4,46 $\pm$ 1,26	16,68 $\pm$ 2,91	16,08 $\pm$ 2,58	31,47 $\pm$ 9,02
σ	2,81	8,24	6,82	20,16
Cv	63,0	49,4	42,4	64,1
G	3,96	15,07	14,30	24,68
Me	3,42	14,74	18,92	27,32
^{90}Sr				
min–max	0,60–1,35	0,58–4,96	1,68–6,82	0,65–55,64
Ci	0,58–1,34	2,33–4,62	2,59–5,58	–9,77–46,23
$M \pm m$	0,96 $\pm$ 0,14	3,48 $\pm$ 0,48	4,08 $\pm$ 0,61	18,23 $\pm$ 10,08
σ	0,31	1,37	1,62	22,55
Cv	32,0	39,3	39,6	123,7
G	0,92	3,02	3,78	6,25
Me	0,88	3,84	4,08	13,50

Примечание. Здесь и далее: n – количество ВПП, min и max – минимальное и максимальное значения, Ci – доверительный интервал на 95 % уровне значимости, M – среднее арифметическое значение, $\pm m$ – стандартная ошибка среднего значения, σ – среднеквадратическое отклонение, Cv – коэффициент вариации, %, G – среднее геометрическое, Me – среднее срединное значение, медиана.

Наименьшая средняя арифметическая As ^{137}Cs в ЛП установлена в дубравах прируслово-пойменных. В кисличном и снытевом типах леса она увеличивается в 3,5 раза и максимума достигает в ЛП дубрав злаково-пойменных. Достоверно по этому показателю различаются только дубрава прируслово-пойменная с дубравами кисличной ($t_{\text{факт.}} = 2,909 > t_{0,95} = 2,228$), снытевой ($t_{\text{факт.}} = 3,332 > t_{0,95} = 2,201$) и злаково-пойменной ($t_{\text{факт.}} = 2,654 > t_{0,95} = 2,306$). Средние арифметические величины As ^{90}Sr в ЛП возрастают в ряду дубрава прируслово-пойменная < дубрава кисличная < дубрава снытевая < дубрава злаково-пойменная. По концентрации радионуклида в ЛП достоверно между собой различаются дубрава прируслово-пойменная с дубравами кисличной ($t_{\text{факт.}} = 3,742$) и снытевой ($t_{\text{факт.}} = 3,881$).

В большинстве типов леса наблюдается обычная для радиоэкологических исследований вариабельность средних арифметических величин As ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП (32–64 %), в то время как коэффициент вариации средней концентрации ^{90}Sr в подстилках дубравы злаково-пойменной чрезвычайно высокий.

Так как в пойменных дубравах доверительные интервалы $As^{137}Cs$ и ^{90}Sr в ЛПП односторонне выходят за границы выборок, то для более адекватной оценки средних ее значений по типам леса дополнительно были рассчитаны медианные и средние геометрические значения As обоих радионуклидов. Их величины существенно отклоняются от средних арифметических только по $As^{90}Sr$ и, в меньшей степени, по $As^{137}Cs$ в ЛПП дубравы злаково-пойменной. Акцентируем внимание на том, что значения всех трех средних показателей As обоих радионуклидов в ЛПП синхронно увеличиваются в типологическом ряду дубрава прируслово-пойменная < дубрава кисличная ≤ дубрава снытевая < дубрава злаково-пойменная.

$Mr^{137}Cs$ и ^{90}Sr в ЛПП дубрав ЗО ЧАЭС крайне неоднородны (табл. 4). Отношения частных максимальных определений $Mr^{137}Cs$ к минимальным по типам леса составляет 5,5–11,1 раз, в целом по формации – 30,5 раз; для $Mr^{90}Sr$ они равны 2,7–69,5 и 146 раз соответственно.

Таблица 4

Статистические показатели запасов ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных подстилках, $кБк/м^2$

Table 4

Statistical indicators of the ^{137}Cs and ^{90}Sr stocks in forest litters, $кБк м^{-2}$

Статистический показатель	Дубрава			
	прируслово-пойменная	кисличная	снытевая	злаково-пойменная
^{137}Cs				
n	5	8	7	5
min–max	3,60–19,82	11,30–64,21	6,15–68,40	14,32–109,84
Ci	0,00–16,28	20,26–49,95	23,84–67,27	17,60–109,92
$M \pm m$	$7,80 \pm 3,06$	$35,10 \pm 6,28$	$45,56 \pm 8,87$	$61,06 \pm 17,60$
σ	6,84	17,76	23,48	39,35
Cv	87,7	50,6	51,5	64,4
G	6,20	31,02	36,33	48,79
Me	5,42	29,62	56,53	54,12
^{90}Sr				
min–max	0,84–2,24	1,15–11,00	2,19–24,56	1,76–122,40
Ci	0,80–2,27	4,71–9,81	4,99–18,78	0,00–38,19
$M \pm m$	$1,54 \pm 0,26$	$7,26 \pm 1,08$	$11,88 \pm 2,83$	$35,73 \pm 22,50$
σ	0,59	3,05	7,46	50,30
Cv	38,4	42,0	62,7	140,8
G	1,44	6,21	9,61	12,35
Me	1,75	7,85	10,31	17,55

Средние арифметические значения $Mr^{137}Cs$ в ЛПП возрастают в ряду дубрава прируслово-пойменная – дубрава кисличная – дубрава снытевая – дубрава злаково-пойменная. Но из-за высокой вариабельности средних значений (51–88 %) достоверно по этому показателю различаются только дубрава прируслово-пойменная от дубрав кисличной ($t_{факт.} = 3,025$), снытевой ($t_{факт.} = 3,187$) и злаково-пойменной ($t_{факт.} = 2,667$). Средние запасы ^{90}Sr в ЛПП увеличиваются в той же последовательности типов леса при достоверных различиях между дубравой прируслово-пойменной, с одной стороны, и дубравами кисличной ($t_{факт.} = 3,813$) и снытевой ($t_{факт.} = 2,823$) – с другой.

Доверительные интервалы запасов обоих радионуклидов в ЛПП дубрав имеют, как правило, односторонние выходы за диапазоны выборок. Рассчитанные в связи с этим средние геометрические и медианные значения $Mr^{137}Cs$ в той или иной мере отклоняются от средних арифметических величин, чаще в сторону уменьшения, во всех типах дубрав, кроме снытевой. Те же средние величины $Mr^{90}Sr$ в ЛПП в основном близки к средним арифметическим значениям, но в 2 раза меньше их в дубраве злаково-пойменной. Тем не менее, и медианные и средние геометрические значения запасов ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛПП возрастают в типологическом ряду дубрава прируслово-пойменная < дубрава кисличная < дубрава снытевая < дубрава злаково-пойменная, за исключением близости медианных значений $Mr^{137}Cs$ в дубравах снытевых и злаково-пойменных. Из приведенного анализа следует, что тенденция повышения абсолютного большинства показателей загрязнения ЛПП в дубравах ЗО ЧАЭС ^{137}Cs и ^{90}Sr в приведенном типологическом ряду (табл. 3, 4) является универсальной.

Факторы, влияющие на накопление радионуклидов в ЛПП. Содержание радионуклидов в ЛПП зависит от количества изначально осажденных радиоактивных веществ, последующего их перераспределения

между элементами лесного биогеоценоза, и, в частности, от их баланса в звеньях биологического круговорота «фитоценоз – подстилка» и «подстилка – почва». Перемещение радионуклидов в них обусловлено рядом взаимосвязанных факторов, включающих запасы радионуклидов в экосистемах, степень загрязнения ими опада, интенсивность вертикального перераспределения в ЛП. В соответствии с [1] As радионуклидов в опаде зависит от Ps , породного состава древостоя, почвенных условий и определяющих интенсивность пылепереноса климатических факторов. Уровни загрязнения ЛП определяются характеристиками биогеоценозов, условиями местопроизрастания, составом, толщиной и запасами биомассы ЛП и микробиологической деятельностью в них при ведущей роли фактора влагообеспеченности почв [1; 2; 4; 8; 13; 14]. Влажность почв, в свою очередь, зависит от их гранулометрического состава, положения в рельефе, глубины залегания грунтовых вод, паводковых явлений, погоднo-климатических условий.

Насаждения разных типов дубрав различаются между собой по таксационным характеристикам древостоя, индексам влажности и трофности эдафотопов (табл. 1), толщине и запасу ЛП (табл. 2) и другим показателям.

Связь загрязнения ЛП и почвы радионуклидами в лесных биогеоценозах самая непосредственная, так как, во-первых, ЛП является верхним горизонтом и составной частью лесных почв, во-вторых, почти все осаждаемое при аварии количество ^{137}Cs и ^{90}Sr прошло через ЛП [1] и в настоящее время основные их запасы сосредотачиваются в минеральных горизонтах почвы¹ [8; 9].

Так как As радионуклидов в опаде напрямую зависит от Ps ими почв [1], то вполне логичной является связь показателей загрязнения ЛП дубрав ^{137}Cs и ^{90}Sr с показателями загрязнения 20-сантиметрового подстильно-почвенного комплекса. Это подтверждает тесная корреляция запасов этих радионуклидов с As почвы и Ps в черноольховых лесах ЗО ЧАЭС [25] и почти синхронное изменение показателей As и Mr ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП с Ps в типологическом ряду исследованных дубрав (рис. 2).

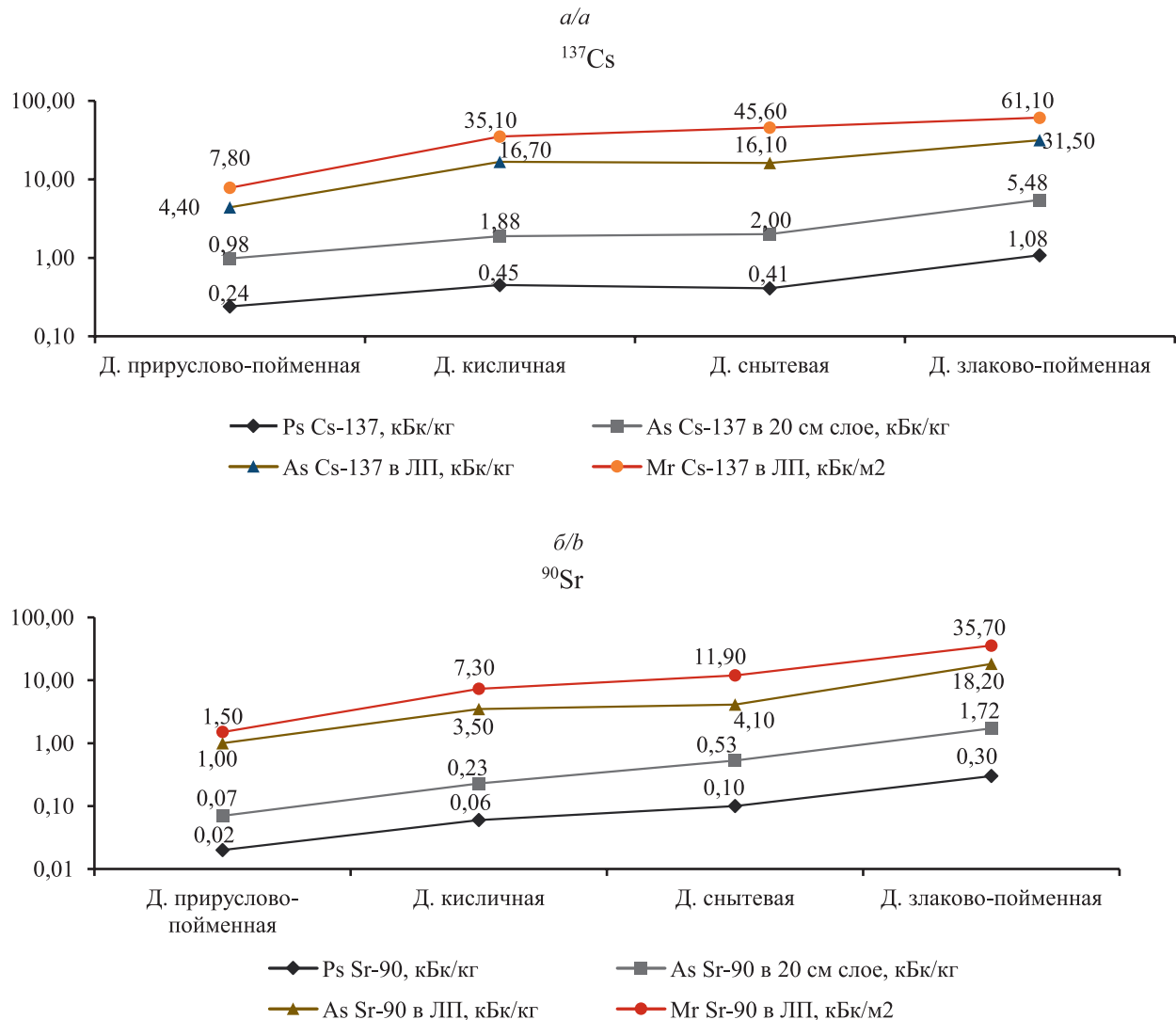


Рис. 2. Показатели загрязнения почвы и лесной подстилки а – ^{137}Cs и б – ^{90}Sr по типам леса

Fig. 2. Indicators of soil and forest litter contamination with а – ^{137}Cs and б – ^{90}Sr by forest types

Критерий Шапиро – Уилка показал, что статистическое распределение большинства включаемых в анализ показателей отличается от нормального (табл. 5), поэтому для определения искомых зависимостей применен коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

Таблица 5

Проверка переменных на нормальность распределения (n = 25)

Table 5

Checking variables for the normality of the distribution (n = 25)

Показа- тель	Удельная активность, кБк/кг				Запас в лесной подстилке, кБк/м ²		Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²		Расстояние до ЧАЭС, км	Лесная подстилка	
	лесной подстилки		почвы							толщина, см	запас, кг/м ²
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr					
<i>W</i>	0,895	0,467	0,667	0,650	0,476	0,469	0,682	0,700	0,854	0,939	0,876
<i>p</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14*	0,01

Примечание. * – нормальное распределение.

Для ЛП дубрав 30 ЧАЭС установлены прямые значимые (здесь и далее – для $p < 0,05$) высокие (здесь и далее – по Чеддоку) корреляции As и Mr ¹³⁷Cs в ЛП с As ¹³⁷Cs в почве и с Ps ¹³⁷Cs, а также As и Mr ⁹⁰Sr в ЛП с As ⁹⁰Sr в почве и с Ps ⁹⁰Sr (табл. 6).

Таблица 6

Коэффициенты корреляции Спирмена между показателями загрязнения лесных подстилок радионуклидами и исследуемыми факторами (n = 25)

Table 6

Spearman correlation coefficients between indicators of contamination of forest litter with radionuclides and the studied factors (n = 25)

Показатель	Удельная активность в лесной подстилке, кБк/кг		Запас в лесной подстилке, кБк/м ²	
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Удельная активность в почве, кБк/кг	0,88*	0,85*	0,85*	– 0,89*
Плотность загрязнения почвы, кБк/м ²	0,83*	0,87*	0,73*	0,90*
Расстояние до ЧАЭС, км	–0,46*	–0,64*	–0,50*	–0,57*
Толщина лесной подстилки, см	0,58*	0,17	0,71*	0,36
Запас лесной подстилки, кг/м ²	0,39	0,18	0,63*	0,38

Примечание. * – значения достоверны на 95 % уровне значимости.

Фактор расстояния до ЧАЭС. С удалением от места выброса радиоактивных веществ имеет место тенденция к снижению количества выпавших радионуклидов, изменению их состава и формы [2; 4; 16], ускоряется интенсивность миграции из ЛП [1], что влияет на загрязнение радионуклидами различных элементов биогеносов. Так, исследованиями [21; 26] выявлены обратные значимые корреляционные связи Ps ¹³⁷Cs, As ¹³⁷Cs в древесине и неокоренных стволах дуба, Ps ⁹⁰Sr, As ⁹⁰Sr в почве, древесине, коре и неокоренных стволах этой породы с расстоянием до реактора в дубравах ближней зоны ЧАЭС.

Установлена обратная слабая значимая корреляция расстояния до ЧАЭС с концентрацией ¹³⁷Cs в ЛП и обратные средние значимые связи с As ⁹⁰Sr в ЛП и с Mr обоих радионуклидов (табл. 6). Низкую силу корреляционных связей обусловили пространственная мозаичность выпадения радионуклидов [1; 2; 16] и влияние других факторов.

Связь загрязнения ЛП радионуклидами с характеристиками подстилок. На корреляцию содержания радионуклидов в ЛП с их мощностью, составом и строением указывается в работе [1], при этом связь активности ¹³⁷Cs с толщиной подстилки прослеживается только до ее мощности 3,5–4 см. Для чистых сосняков установлена достоверная функциональная зависимость между мортмассой полнопрофильных ЛП и количеством в них ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr [2].

В лиственных лесах обычно образуются тонкие неполнопрофильные слабо удерживающие радионуклиды ЛП [1]. В исследованных дубравах их средняя мощность не превышает 3 см, а запасы биомассы варьируют в пределах 1,6–2,7 кг/м² (табл. 2). Толщина ЛП находится в прямой значимой средней по силе связи с A_s ¹³⁷Cs в них и значимой высокой – с Mr ¹³⁷Cs в ней, а мортмасса ЛП со средней силой значимо коррелирует с Mr ¹³⁷Cs. Статистические связи между характеристиками ЛП и показателями их загрязнения ⁹⁰Sr не выявлены (табл. 6).

Связь загрязнения ЛП радионуклидами с таксационными характеристиками древостоев. Загрязнение ЛП ¹³⁷Cs определено его поступлением с растительным опадом и в значительной мере зависит от типа биогеоценоза, а содержание радионуклида в опаде обусловлено уровнем его накопления в древостое [1]. В черноольшаниках ЗО ЧАЭС связи между содержанием ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в ЛП и таксационными показателями древостоев не установлены [25]. В разновозрастном ельнике с примесью березы повислой отмечена значимая положительная корреляция A_s ¹³⁷Cs в ЛП с густотой древостоя [27].

На основании того, что распределения, отличными от нормальных, характеризуются все показатели загрязнения радионуклидами ЛП (табл. 5) и большинство таксационных показателей древостоев дубрав (табл. 7), то при оценке статистических связей между ними использован коэффициент ранговой корреляции Спирмена.

Установлены средние значимые корреляции A_s ¹³⁷Cs и Mr ¹³⁷Cs с классом бонитета, определяющим продуктивность древостоев, со средней высотой деревьев дуба, с суммой площадей сечений и с запасом стволовой древесины, то есть непосредственно с показателями их продуктивности, а также прямые преимущественно средние значимые корреляции A_s ⁹⁰Sr и Mr ⁹⁰Sr в ЛП с классом бонитета и долей примеси в общем составе дубовых древостоев и обратные – со степенью участия в нем дуба (табл. 7).

Таблица 7

Проверка переменных на нормальность распределения и коэффициенты корреляции Спирмена между показателями загрязнения лесной подстилки ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr и таксационными показателями древостоев

Table 7

Checking variables for normality of distribution and Spearman correlation coefficients between forest litter ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr contamination indicators and stand taxation indicators

Удельная актив- ность (A_s) и запас (Mr) ^{137}Cs и ^{90}Sr в подстилке	Доля дуба, %		Доля примеси в общем составе, %	Воз- раст, лет	Средние		Класс бони- тета	Число стволов, шт./га	Сумма площа- дей сечений, м ² /га	Пол- нота	Ство- ловой запас, м ³ /га
	в верх- нем ярусе	в общем составе			высота, м	диа- метр, см					
					дуба						
W	0,912	0,899	0,899	0,909	0,904	0,964	0,886	0,868	0,975	0,957	0,871
P	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,50*	0,01	0,00	0,78*	0,36*	0,00
A_s ^{137}Cs , Бк/кг	−0,25	−0,24	0,24	0,30	0,60**	0,06	0,70**	0,19	0,52**	0,15	0,65**
Mr ^{137}Cs , Бк/м ²	−0,38	−0,33	0,32	0,21	0,54**	0,11	0,67**	0,12	0,40**	0,04	0,52**
A_s ^{90}Sr , Бк/кг	−0,66**	−0,60**	0,58*	−0,02	0,27	−0,12	0,61**	0,38	0,32	0,03	0,36
Mr ^{90}Sr , Бк/м ²	−0,72**	−0,59**	0,58*	−0,05	0,27	−0,02	0,64**	0,26	0,30	−0,04	0,34

Примечание. W – индекс Шапиро–Уилкса, P – показатель точности, A_s – удельная активность, Mr – запас радионуклидов в ЛП, * – нормальное распределение, ** – статистически значимые результаты при $p < 0,05$.

Полагаем, что связь класса бонитета и продуктивности древостоев с активностью радионуклидов в ЛП объясняется тем, что на более производительных почвах формируются более продуктивные насаждения, дающие больше опада, содержащего большее количество радиоактивных веществ.

Связи показателей содержания ⁹⁰Sr в ЛП со степенью участия дуба и примеси других пород в составе древостоев обусловлены видовой спецификой накопления радиоактивных веществ структурными компонентами растений, прежде всего преобладающими в составе опада лесных насаждений листьями деревьев [1; 28], а также особенностями миграции ⁹⁰Sr в подстилке [2; 3]. Так как из-за медленного разложения листьев дуба основную роль в переходе ¹³⁷Cs из ЛП дубрав в подподстилочные слои почвы играет опад подлесочных пород [8], то полагаем, что аналогичное влияние на миграцию ⁹⁰Sr в подстилке исследованных насаждений оказывает опад граба. Граб в значительном количестве (до 40 % запаса) присутствует в господствующих ярусах обследованных древостоев и имеет абсолютное доминирование в подчиненных [29]. Листья дуба характеризуются наименьшей активностью ⁹⁰Sr в сравнении с листьями сосны, ольхи

черной, березы, осины [1]. Показатели накопления ^{90}Sr в листьях подроста граба в дубравах в 1,5–2,5 раза выше, чем в листьях дуба (табл. 8). Концентрация радионуклидов в живых и опавших листьях дуба близка, в то время как в листовом опаде других лиственных пород она выше, чем в вегетирующих [1]. Из этого следует, что с увеличением примеси граба и других пород в древостоях, поступающее в ЛП количество более загрязненного ^{90}Sr листового опада возрастает, а менее загрязненного им опада дуба – уменьшается.

Таблица 8

Показатели содержания ^{90}Sr в листьях подроста дуба и граба

Table 8

Indices of ^{90}Sr content in leaves of oak and hornbeam undergrowths

Тип леса	Удельная активность, Бк/кг		Коэффициент перехода, м ² /кг		Коэффициент накопления	
	дуб	граб	дуб	граб	дуб	граб
Дубрава кисличная / D ₂	1375	3382	0,022	0,055	4,76	11,70
Дубрава снытевая / D ₃	1746	2541	0,010	0,015	1,97	2,87

Погодно-климатические условия³, главным образом осадки, существенно влияют на накопление и разложение опада [30], поступление радионуклидов в ЛП и миграцию их в минеральные слои почв [1]. С конца 1980-х гг. в Полесье наблюдается потепление и аридизация климата [31; 32]. Влияние этого процесса на леса выражается в понижении уровней грунтовых вод, ухудшении влагообеспеченности первых весенних месяцев, увеличении дефицита влаги летом⁴. По данным исследовательской станции «Масаны», расположенной на территории ЗО ЧАЭС, в период региональной засухи 2015–2021 гг. количество осадков было ниже среднееголетней нормы или близко к ней, что в совокупности с повышенной температурой воздуха формировало дефицит увлажнения территории (табл. 9). Это привело к опусканию уровней подземных вод, пониженных в результате широкомасштабного осушения болот Полесья в 1950–1980 гг., иссушению верхних слоев почв и ЛП, замедлению разложения органического вещества. В итоге увеличились мощность и запас ЛП, а следовательно, и удерживаемое ими количество радионуклидов. Таким образом, воздействие погодно-климатических условий на содержание радионуклидов в ЛП проявляется через обеспечение влагой дубовых фитоценозов.

Таблица 9

Показатели тепло- и влагообеспеченности территории зоны отчуждения Чернобыльской АЭС за май–сентябрь (числитель) и за год (знаменатель), по данным научно-исследовательской станции «Масаны»

Table 9

Indicators of heat and moisture availability in the Chernobyl NPP exclusion zone territory for May-September (numerator) and for a year (denominator) according to the data of the research station «Masany»

Год	Метеорологический показатель		
	средняя температура воздуха, °C	количество осадков, мм	коэффициент увлажнения по Иванову
2015	17,9 / 8,7	180,2 / 453,9	0,36 / 0,54
2016	17,6 / 8,7	280,6 / 722,3	0,64 / 1,08
2017	17,2 / 8,4	311,0 / 652,1	0,72 / 1,04
2018	18,6 / 8,7	297,3 / 556,7	0,54 / 0,70
2019	17,9 / 9,3	183,1 / 377,1	0,46 / 0,55
2020	17,6 / 10,0	385,7 / 622,1	0,95 / 0,91
2021	17,7 / 8,2	295,0 / 519,1	0,81 / 0,75

Примечание. Среднееголетняя норма количества осадков – 609 мм, температуры воздуха – +7,8 °C [33].

³ Данный пункт является результатом логического анализа.
⁴ Стратегия адаптации лесного хозяйства Республики Беларусь к изменению климата на период до 2050 года. Минск: Минлесхоз; 2011. 119 с.

Влияние условий местопроизрастания. В работе [2] указывается на неоднозначность литературных сведений о влиянии условий местопроизрастания на накопление радионуклидов в ЛП. Их способность удерживать радиоактивные вещества возрастает от гидроморфных и полугидроморфных почв до автоморфных [1; 2]. В ЛП сосняков с повышением трофности и влажности почв происходит снижение запаса ^{137}Cs и ^{90}Sr [2]. В распределении радионуклидов по компонентам фитоценозов, включая подстилку, доля содержания ^{137}Cs в ЛП березняка черничного в сравнении с березняком мшистым уменьшается в 6 раз, ^{90}Sr – в 1,5 раза [5], что свидетельствует о значительном влиянии типа леса и типа лесорастительных условий на загрязнение подстилок радионуклидами в лиственных лесах. Быстрее всего от ^{137}Cs освобождаются ЛП на плодородных (трофотопы С и D) мокрых, сырых и влажных почвах [8]. Имеется информация о снижении ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП дубрав ЗО ЧАЭС при повышении уровней грунтовых вод [34].

Запасы радионуклидов в ЛП возрастают в ряду типов леса дубрава прируслово-пойменная – дубрава кисличная – дубрава снытевая – дубрава злаково-пойменная ($A_2, B_2 - D_2 - D_3 - C_{2-3}$). В этом же ряду понижается рельеф, уровень грунтовых вод приближается к дневной поверхности, увеличивается влажность почв и улучшается их влагообеспеченность в целом [24]. В том же направлении растут мощность ЛП (табл. 2) и запасы в ней ^{137}Cs и ^{90}Sr (табл. 3, 4).

Количество радиоактивных выпадений в лесах определяется условиями их осаждения, геоморфологией поверхности, типом биогеоценоза, составом древесного яруса [1; 2; 14]. Минимальные запасы ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП дубрав прируслово-пойменных обусловлены произрастанием насаждений на повышенных элементах рельефа открытой и полукрытой поймы [21], самыми низкими показателями густоты и продуктивности древостоев (табл. 1), тонкими подстилками с малыми запасами мортмассы (табл. 2). Близкие уровни ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП дубрав кисличных и снытевых (табл. 3) обеспечены одинаковыми условиями выпадения радионуклидов [21], выравниванием толщины подстилки в связи с засушливыми погодными условиями [24]. В дубравах злаково-пойменных, благодаря периодическому весеннему подтоплению и более близкому залеганию грунтовых вод летом и осенью, формируются более мощные ЛП с запасами близкими к дубравам кисличным. Однако высокое их загрязнение радионуклидами определено преобладающим фактором близости к ЧАЭС.

Таким образом, условия местопроизрастания дифференцируют характеристики ЛП в дубравах и являются одним из значимых факторов, определяющих уровни их загрязнения.

Суммарный запас ^{137}Cs в ЛП дубрав ближней зоны ЗО ЧАЭС на площади 49,21 км² по разным средним значениям оценивается от 1654,5 до 2017,6×10⁹ Бк, ^{90}Sr – от 398,0 до 805,8×10⁹ Бк (табл. 10), с наиболее вероятными величинами – 1865×10⁹ Бк ^{137}Cs и 456×10⁹ Бк ^{90}Sr .

Таблица 10

Оценочный запас радионуклидов в лесной подстилке дубрав ближней зоны Чернобыльской АЭС

Table 10

Estimated stock of radionuclides in the forest litter of oak forests in the near zone of the Chernobyl NPP

Показатель		Дубрава				Всего по дубовой формации
		кисличная, орляковая, черничная	снытевая, папоротниковая, крапивная	прируслово-пойменная	злаково-пойменная, ольхово-пойменная, широколиственно-пойменная, пойменная	
Площадь, га		1461,0	1051,3	835,7	1573,2	4921,2
Запас ^{137}Cs в ЛП, кБк/м ²	М	35,10	45,56	7,80	61,06	–
	G	31,02	36,33	6,20	48,79	–
	Me	29,62	56,53	5,42	54,12	–
Запас ^{90}Sr в ЛП, кБк/м ²	М	7,26	11,88	1,54	35,73	–
	G	6,21	9,61	1,44	12,35	–
	Me	7,85	10,31	1,75	17,55	–
Общий запас ^{137}Cs в ближней зоне, 10 ⁹ Бк	М	512,8	479,0	65,2	960,6	2017,6
	G	453,2	381,9	51,8	767,6	1654,5
	Me	432,7	594,3	45,3	851,4	1923,7
Общий запас ^{90}Sr в ближней зоне, 10 ⁹ Бк	М	106,1	124,9	12,7	562,1	805,8
	G	90,7	101,0	12,0	194,3	398,0
	Me	114,7	108,4	14,6	276,1	513,8

Примечание. Полужирным шрифтом выделены базовые типы леса дубрав.

При оценке запасов радионуклидов в ЛП дубрав произвели группировку типов леса путем их присоединения к базовым (для которых выполнены расчеты запасов ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП) с учетом условного сходства эдафических условий, близости классов бонитета, определенных на основе анализа лесотипологических таблиц [35]. В группу дубравы кисличной (D_2) включили дубравы орляковую (C_2) и черничную (C_3), характеризующиеся III и II классами бонитетов; в группу дубравы снытевой (D_3) – дубравы крапивную (D_4) и папоротниковую (C_4) I–II бонитетов, произрастающие на влажных и сырых почвах. К локализованной на наиболее бедных почвах дубраве прируслово-пойменной (IV класс бонитета) другие типы леса не присоединяли. Все остальные типы пойменных дубрав III и II классов бонитета объединили в группу дубравы злаково-пойменной.

На основе данных работы [11], с учетом рассчитанных запасов ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП (табл. 10) установлено, что удельный вес запаса ^{137}Cs в подстилках составлял 40,5–45,1 % (в среднем 43,1 %) от общего запаса радионуклида, ассоциированного с органическим веществом в фитоценозе; аналогичный показатель для ^{90}Sr – 33,4–50,4 % (36,5 %). Таким образом, ЛП в биоценозах дубрав ближней зоны ЧАЭС через 35 лет после выпадения радиоактивных веществ продолжают оставаться значимыми аккумуляторами ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Заключение

Лесные подстилки дубрав ближней зоны ЧАЭС на протяжении 35 лет с момента аварии являются одним из основных хранилищ радионуклидов. На начало осени 2021 г. суммарный запас ^{137}Cs в них оценивался в среднем от 1,65 до $2,02 \times 10^{12}$ Бк, ^{90}Sr – от 0,51 до $0,80 \times 10^{12}$ Бк, или в среднем 43,1 % ^{137}Cs и 36,5 % ^{90}Sr от их запаса, ассоциированного с органическим веществом фитоценоза.

Запасы ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП дубовых лесов пространственно неоднородны. Запасы и удельная активность обоих радионуклидов в ЛП увеличиваются в ряду типов леса дубрава прируслово-пойменная < дубрава кисличная ≤ дубрава снытевая < дубрава злаково-пойменная.

Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в ЛП дубрав коррелируют с их удельной активностью в 20-сантиметровом почвенно-подстилочном слое, зависят от условий местопроизрастания, погодного-климатических факторов, продуктивности древостоев, а также мощности и запасов мортмассы ЛП (^{137}Cs), доли примеси лиственных пород в составе древостоев (^{90}Sr).

Библиографические ссылки

1. Щеглов АИ. *Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС*. Москва: Наука; 2000. 268 с.
2. Переволоцкий АН. *Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах*. Гомель: Институт радиологии; 2006. 255 с.
3. Ипатьев ВА, Булко НИ, Митин НВ, Шабалева МА, Диденко ЛГ. *Радиоэкологический феномен лесных экосистем*. Гомель: ИЛ НАН Беларуси; 2004. 310 с.
4. Ипатьев ВА, Багинский ВФ, Булавик ИМ, Дворник АМ, Волчков ВЕ, Гончаренко ГГ, Поджаров ВК, Булко НИ, Бордок ИВ, Волович ПИ, Гедых ВБ, Гримашевич ВВ, Диденко ЛГ, Есимчик ЛД, Жученко ТА, Кейзер ГИ, Ковалевич АИ, Кожевников АМ, Колодий ПВ, Копытков ВВ, Крушев ЛТ, Марченко ЯИ, Митин НВ, Падутов АЕ, Падутов ВЕ, Переволоцкий АН, Пикублик ММ, Сидор АИ, Силин АЕ, Степанчик ВВ, Тарасенко ВП, Трухоновец ВВ, Усень ВВ, Фомина ВИ, Хотылева ЛВ, Чунихин ЛА, Шевчук ВЕ, Яцына АА. *Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации*. Гомель: Речицкая укрупненная типография; 1999. 454 с.
5. Матусов ГД, Воронцовская АН, Китиков ВИ. Распределение радионуклидов в лесных биогеоценозах. *Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития*. 2013;211–221.
6. Kudzin M, Zabrotski V, Harbaruk D. Distribution of ^{137}Cs Between the Components of Pine Forest of Chernobyl NPP Exclusion Zone. *Impact of Cesium on Plants and the Environment*. 2017;149–169.
7. Kudzin M, Zabrotski V, Garbaruk D, Uhlianets A. ^{90}Sr in the Components of Pine Forest of Belarusian Part of Chernobyl NPP Exclusion Zone. *The Handbook of Environmental Chemistry*. 2020;88:159–183.
8. Булко НИ, Толкачева НВ, Потапенко АМ, Козлов АК, Машков ИА, Митин НВ, Шабалева МА, Серенкова ВА, Бутыковец ВВ. Поведение ^{137}Cs в лесных почвах (факторы, динамика, прогноз). В: *Лесные экосистемы: современные вызовы, состояние, продуктивность и устойчивость. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Института леса НАН Беларуси, г. Гомель, 13–15 ноября 2020 г.* Гомель: Институт леса НАН Беларуси; 2020:314–319.
9. Головешкин ВВ, Ненашев РА, Белаш ВЕ, Баленок АА, Карандевич АА. Исследование влияния погодного-климатических условий на параметры миграции радионуклидов в почвах зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. В: *Радиобиология и экологическая безопасность – 2024. Материалы Международной научной конференции, г. Гомель, 30–31 мая 2024 г.* Минск: ИВЦ Минфина; 2024:56–60.
10. Гарбарук ДК, Углынец АВ, Шумак СВ. Потенциальный вклад компонентов черноольховых насаждений заповедной зоны ППРЭЗ в биомассу лесных горючих материалов и содержание в них ^{137}Cs и ^{90}Sr . *Ботаника (исследования)*. 2021;50:123–139.
11. Углынец АВ, Гарбарук ДК. Оценка запаса лесных горючих материалов в компонентах дубовых лесов ближней зоны ЧАЭС и содержания в них ^{137}Cs и ^{90}Sr . *Ботаника (исследования)*. 2023;52:143–154.
12. Сысоева Е, Ларионова НВ, Лещенко НА, Меркель АИ. Искусственные радионуклиды в лесной подстилке на территории, прилегающей к Семипалатинскому испытательному полигону. В: *Радиоэкологические последствия радиационных аварий –*

к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС. Сборник докладов Международной научно-практической конференции, г. Обнинск, 22–23 апреля 2021 г. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ; 2021:134–137.

13. Павлоцкая ФИ. Миграция радиоактивных продуктов глобальных выпадений в почвах. Москва: Атомиздат; 1974. 216 с.
14. Краснов ВП, Орлов ОО, Бузун ВО, Ландін ВП, Шелест ЗМ. Прикладна радіоекологія лісу. Житомир: Полісся; 2007. 680 с.
15. Пискунов ВС, Савельев ВВ. Загрязнение лесных фитоценозов ПГРЭС радионуклидами. В: *Экологический статус загрязненных радионуклидами территорий. Тезисы докладов Международного рабочего совещания, г. Минск, 19–20 апреля 1995 г.* Минск: Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова АНБ; 1995:104.
16. Израэль ЮА, Богдевич ИМ. *Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия–Беларусь)*. Москва: Фонд «Инфосфера»–НИА–Природа; Минск: Белкартография; 2009. 140 с.
17. Кабанов СВ. Взаимосвязи запаса лесной подстилки с таксационными показателями дубовых низкоствольников. *Лесной журнал*. 1990;3:13–17.
18. Ковязин ВФ, Мартынов АН, Мельников ЕС, Аникин АС, Минаев ВН, Беляева НВ. *Основы лесного хозяйства и таксация леса*. Санкт-Петербург: Лань; 2010. 384 с.
19. Мирошников ВС, Труль ОА, Ермаков ВЕ, Дольский ЛВ, Костенко АГ. *Справочник таксатора*. Минск: Ураджай; 1980. 360 с.
20. Кузьменков МВ, Кулагин АП, Таркан АВ, Бузуновский РС. *Таксационно-лесоустроительный справочник*. Минск: Лесное и охотничье хозяйство; 2019. 335 с.
21. Углынец АВ, Гарбарук ДК. Оценка загрязнения древесины и коры дуба ^{137}Cs в зоне отчуждения Чернобыльской атомной электростанции. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;4:33–45. DOI: 10.46646/2521-683X/2022-4-33-45.
22. Лапа ВВ, Цыбулько НН, Цырибко ВБ, Устинова АМ, Червань АН, Логачев ИА, Кудин МВ, Антипенко ОН. *Почвы Полесского государственного радиационно-экологического заповедника*. Минск: ИВЦ Минфина; 2019. 97 с.
23. Богатырев ЛГ, Демин ВВ, Матышак ГВ, Сапожникова ВА. О некоторых теоретических аспектах исследования лесных подстилок. *Лесоведение*. 2004;4:17–29.
24. Углынец АВ, Гарбарук ДК. Запасы лесных подстилок в дубовых лесах белорусского сектора зоны отчуждения Чернобыльской атомной электростанции. *Лесоведение*. 2024;5:534–544. DOI: 10.31857/S0024114824050082
25. Гарбарук ДК, Углынец АВ, Шумак СВ. Запасы лесных подстилок и содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в черноольховых лесах зоны отчуждения Чернобыльской атомной электростанции. *Почвоведение*. 2022;12:1610–1620. DOI: 10.31857/S0032180X22100318.
26. Углынец АВ, Гарбарук ДК. Современное загрязнение стволов дуба ^{90}Sr в ближней зоне радиоактивных выпадений чернобыльского следа. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2023;83:282–293.
27. Липатов ДН, Щеглов АИ, Манахов ДВ. Влияние таксационных показателей древостоя на распределение чернобыльского радиоевлия в экотопах ельника. В: *Лесные почвы и функционирование лесных экосистем. Материалы VII Всероссийской научной конференции с международным участием, г. Москва, 24–27 сентября 2019 г.* Москва: ЦЭПЛ РАН; 2019:339–342.
28. Парфенов ВИ, Якушев БИ, Мартинович БС, Заболотный АИ, Дмитриева СА, Кабашникова ГИ, Кауров ИА, Моисеенко ИФ, Рахтеенко ЛИ, Савельев ВВ, Будкевич ТА, Ермакова ОО, Федоров ВН, Болотских ТН, Казей АП, Кузьмич ОТ, Пискунов ВС, Сак ММ, Голушко РМ, Жмойдяк РН. *Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси (в связи с аварией на Чернобыльской АЭС)*. Минск: Навука і тэхніка; 1995. 582 с.
29. Углынец АВ, Гарбарук ДК, Шумак СВ. Динамика и продуктивность дубрав в условиях отсутствия хозяйственной деятельности на юго-востоке Белорусского Полесья. *Труды БГТУ. Серия 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2022;2(258):55–66. DOI: 10.52065/2519-402X-2022-258-2-55-66.
30. Карпачевский ЛЮ. *Лес и лесные почвы*. Москва: Лесная промышленность; 1981. 264 с.
31. Логинов ВФ, Лысенко СА, Мельник ВИ. *Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования*. Минск: Энциклопедикс; 2020. 264 с.
32. Бровка ЮА, Буяков ИВ. Изменение гидротермического коэффициента и повторяемости экстремальных условий увлажнения на территории Беларуси в период потепления климата. *Природопользование*. 2020;2:5–18. DOI: 10.47612/2079-3928-2020-2-5-18.
33. Марченко ЮД. Погодно-климатические условия в ближней зоне Чернобыльской АЭС. *Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития*. 2013:32–45.
34. Переволоцкая ТВ. Вертикальная миграция ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных почвах под влиянием изменения уровня грунтовых вод. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2009;69:621–636.
35. Юркевич ИД. *Выделение типов леса при лесоустроительных работах*. Минск: Наука и техника; 1980. 120 с.

References

1. Shcheglov AI. *Biogekhimiya tekhnogennykh radionuklidov v lesnykh ekosistemakh: po materialam 10-letnikh issledovaniy v zone vliyaniya avarii na ChAES* [Biogeochemical migration of technogenic radionuclides in forest ecosystems: by the materials of 10-year research in the area affected by the Chernobyl accident]. Moscow: Nauka; 2000. 268 p. Russian.
2. Perevolotskii AN. *Raspredelenie ^{137}Cs i ^{90}Sr v lesnykh biogeotsenozakh* [Distribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr in forest biogeocenoses]. Gomel': Institut radiologii; 2006. 255 p. Russian.
3. Ipat'ev VA, Bulko NI, Mitin NV, Shabaleva MA, Didenko LG. *Radioekologicheskii fenomen lesnykh ekosistem* [Radioecological phenomenon of forest ecosystems]. Gomel': IL NAN Belarusi; 2004. 310 p. Russian.
4. Ipat'ev VA, Baginskii VF, Bulavik IM, Dvornik AM, Volchikov VE, Goncharenko GG, Podzharov VK, Bulko NI, Bordok IV, Volovich PI, Gedykh VB, Grimashevich VV, Didenko LG, Esimchik LD, Zhuchenko TA, Keizer GI, Kovalevich AI, Kozhevnikov AM, Kolodii PV, Kopytkov VV, Krushev LT, Marchenko YaI, Mitin NV, Padutov AE, Padutov VE, Perevolotskii AN, Pikulik MM, Sidor AI, Silin AE, Stepanchik VV, Tarasenko VP, Trukhonovets VV, Usenya VV, Fomina VI, Khotyleva LV, Chunikhin LA, Shevchuk VE,

Yatsyna AA. *Les. Chelovek. Chernobyl'. Lesnye ekosistemy posle avarii na Chernobyl'skoi AES: sostoyanie, prognoz, reaktsiya naseleniya, puti reabilitatsii* [Forest. Human. Chernobyl. Forest ecosystems after the accident at the Chernobyl NPP: condition, prediction, response of the population, ways of rehabilitation]. Gomel': Rechitskaya ukрупnennaya tipografiya, 1999. 454 p. Russian.

5. Matusov GD, Voronetskaya AN, Kitikov VI. *Raspredelenie radionuklidov v lesnykh biogeotsenozakh* [Distribution of radionuclides in forest biogeocenoses]. *Ekosistemy i radiatsiya: aspekty sushchestvovaniya i razvitiya*. 2013:211–221.

6. Kudzin M, Zabrotski V, Harbaruk D. Distribution of ^{137}Cs Between the Components of Pine Forest of Chernobyl NPP Exclusion Zone. *Impact of Cesium on Plants and the Environment*. 2017:149–169.

7. Kudzin M, Zabrotski V, Garbaruk D, Uhljanets A. ^{90}Sr in the Components of Pine Forest of Belarusian Part of Chernobyl NPP Exclusion Zone. *The Handbook of Environmental Chemistry*. 2020;88:159–183.

8. Bulko NI, Tolkacheva NV, Potapenko AM, Kozlov AK, Mashkov IA, Mitin NV, Shabaleva MA, Serenkova VA, But'kovets VV. *Povedenie ^{137}Cs v lesnykh pochvakh (faktory, dinamika, prognoz)* [Behavior of ^{137}Cs in forest soils (factors, dynamics, forecast)]. In: *Lesnye ekosistemy: sovremennye vyzovy, sostoyanie, produktivnost' i ustoichivost'* [Forest ecosystems: current challenges, status, productivity and sustainability]. Gomel': Institut lesa NAN Belarusi; 2020:314–319. Russian.

9. Goloveshkin VV, Nenashev RA, Belash VE, Balenok AA, Karandevich AA. *Issledovanie vliyaniya pogodno-klimaticheskikh uslovii na parametry migratsii radionuklidov v pochvakh zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [Research of the influence of weather and climatic conditions on the parameters of radionuclide migration in soils of the Exclusion Zone of the Chernobyl NPP]. In: *Radiobiologiya i ekologicheskaya bezopasnost' – 2024* [Radiobiology and environmental safety – 2024]. Minsk: IVTs Minfina; 2024:56–60. Russian.

10. Garbaruk DK, Uglyanets AV, Shumak SV. *Potentsial'nyi vklad komponentov chernool'khovykh nasazhdenii zapovednoi zony PGREZ v biomassu lesnykh goryuchikh materialov i sodержanie v nikh ^{137}Cs i ^{90}Sr* [Potential contribution of black alder plantations components into forest combustible materials and the ^{137}Cs and ^{90}Sr content on the protected area of the PSRER]. *Botanika (issledovaniya)*. 2021;50:123–139. Russian.

11. Uglyanets AV, Garbaruk DK. *Otsenka zapasa lesnykh goryuchikh materialov v komponentakh dubovykh lesov blizhnei zony ChAES i sodержaniya v nikh ^{137}Cs i ^{90}Sr* [Assessment of the forest combustible materials reserve in the oak forests components in the Chernobyl Nuclear Power Plant near zone and the content of ^{137}Cs and ^{90}Sr in them]. *Botanika (issledovaniya)*. 2023;52:143–154. Russian.

12. Sysoeva E., Larionova NV, Leshchenko NA, Merkel' AI. *Iskusstvennye radionuklidy v lesnoi podstilke na territorii, prilgayushchei k Semipalatinskomu ispytatel'nomu poligonu* [Artificial radionuclides in the forest litter at the territory adjacent to Semipalatinsk test site]. In: *Radioekologicheskie posledstviya radiatsionnykh avarii – k 35-oi godovshchine avarii na ChAES* [Radioecological consequences of radiation accidents: to the 35th anniversary of the Chernobyl accident]. Obninsk: FGBNU VNIIRAE; 2021:134–137. Russian.

13. Pavlotskaya FI. *Migratsiya radioaktivnykh produktov global'nykh vypadenii v pochvakh* [Migration of radioactive products of global fallout in soils]. Moscow: Atomizdat; 1974. 216 p. Russian.

14. Krasnov VP, Orlov OO, Buzun VO, Landin VP, Shelest ZM. *Prikladna radioekologiya lisu* [Applied radioecology of the forest]. Zhitomir: Polissya; 2007. 680 p. Russian.

15. Piskunov VS, Savel'ev VV. *Zagryaznenie lesnykh fitotsenozov PGREZ radionuklidami* [Radionuclide contamination of forest phytocenoses of PSRER]. In: *Ekologicheskii status zagryaznennykh radionuklidami territorii* [Ecological status of territories polluted by radionuclides]. Minsk: Institut teplo- i massoobmena imeni AV. Lykova ANB; 1995:104. Russian.

16. Izrael' YuA, Bogdevich IM. *Atlas sovremennykh i prognoznnykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoi AES na postradavshikh territoriyakh Rossii i Belarusi (ASPA Rossiya–Belarus')* [Atlas of modern and predictive aspects of the consequences of the Chernobyl Nuclear Power Plant accident in the affected territories of Russia and Belarus (AMPA Russia–Belarus)]. Moscow: Fond «Infosfera»–NIA–Priroda; Minsk: Belkartografiya; 2009. 140 p. Russian.

17. Kabanov CB. *Vzaimosvyazi zapasa lesnoi podstilki s taksatsionnymi pokazatelyami dubovykh nizkostvol'nikov* [Relationships of forest litter stock with taxation indices of low oak stands]. *Lesnoi zhurnal*. 1990;3:13–17. Russian.

18. Kovyazin VF, Martynov AN, Mel'nikov ES, Anikin AS, Minaev VN, Belyaeva NV. *Osnovy lesnogo khozyaistva i taksatsiya lesa* [Fundamentals of forestry and forest inventory]. Saint Petersburg: Lan'; 2010. 384 p. Russian.

19. Miroshnikov VS, Trull' OA, Ermakov VE, Dol'skii LV, Kostenko AG. *Spravochnik taksatora* [Taxator's Handbook]. Minsk: Uradzhai; 1980. 360 p. Russian.

20. Kuz'menkov MV, Kulagin AP, Tarkan AV, Buzunovskii RS. *Taksatsionno-lesoustroitel'nyy spravochnik* [Taxation and forest inventory guide]. Minsk: Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo; 2019. 335 p. Russian.

21. Uglyanets AV, Garbaruk DK. *Otsenka zagryazneniya drevesiny i kory duba ^{137}Cs v zone otchuzhdeniya Chernobyl'skoi atomnoi elektrostantsii* [Assessment of oak wood and bark contamination by ^{137}Cs in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya*. 2022;4:33–45. Russian. DOI: 10.46646/2521-683X/2022-4-33-45.

22. Lapa VV, Tsybul'ko NN, Tsyribko VB, Ustinova AM, Chervan' AN, Logachev IA, Kudin MV, Antipenko ON. *Pochvy Poles'skogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika* [Soils of Polesye state radiation-ecological reserve]. Minsk: IVTs Minfina; 2019. 97 p. Russian.

23. Bogatyrev LG, Demin VV, Matyshak GV, Sapozhnikova VA. *O nekotorykh teoreticheskikh aspektakh issledovaniya lesnykh podstilok* [On some theoretical aspects of studying forest litters]. *Lesovedenie*. 2004;4:17–29. Russian.

24. Uglyanets AV, Garbaruk DK. *Zapasy lesnykh podstilok v dubovykh lesakh belorusskogo sektora zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi atomnoi elektrostantsii* [Stocks of forest litter in the oak forests of the Chernobyl Nuclear Power Plant Exclusion Zone]. *Lesovedenie*. 2024;5:534–544. Russian. DOI: 10.31857/S0024114824050082

25. Garbaruk DK, Uglyanets AV, Shumak SV. *Zapasy lesnykh podstilok i sodержanie ^{137}Cs i ^{90}Sr v chernool'khovykh lesakh zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi atomnoi elektrostantsii* [Forest litter stocks and content of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the black alder forests of the Chernobyl Nuclear Power Plant Exclusion Zone]. *Pochvovedenie*. 2022;12:1610–1620. Russian. DOI: 10.31857/S0032180X22100318.

26. Uglyanets AV, Garbaruk DK. *Sovremennoe zagryaznenie stvolov duba ^{90}Sr v blizhnei zone radioaktivnykh vypadenii chernobyl'skogo sleda* [Oak trunks modern contamination with ^{90}Sr in the near zone of radioactive fallout of the chernobyl trace]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2023;83:282–293. Russian.

27. Lipatov DN, Shcheglov AI, Manakhov DV. *Vliyanie taksatsionnykh pokazatelei drevostoya na raspredelenie chernobyl'sko-go radiotseziya v ekotopakh el'nika* [Influence of stand taxation parameters on the distribution of Chernobyl radiocaesium in spruce forest ecotopes]. In: *Lesnye pochvy i funktsionirovanie lesnykh ekosistem* [Forest soils and forest ecosystem functioning]. Moscow: TsEPL RAN; 2019:339–342. Russian.
28. Parfenov VI, Yakushev BI, Martinovich BS, Zabolotnyi AI, Dmitrieva SA, Kabashnikova GI, Kaurov IA, Moiseenko IF, Rakhtenko LI, Savel'ev VV, Budkevich TA, Ermakova OO, Fedorov VN, Bolotskikh TN, Kazei AP, Kuz'mich OT, Piskunov VS, Sak MM, Golushko RM, Zhmoidyak RN. *Radioaktivnoe zagryaznenie rastitel'nosti Belarusi (v svyazi s avariei na Chernobyl'skoi AES)* [Radioactive contamination of vegetation in Belarus (in connection with the Chernobyl NPP accident)]. Minsk: Navuka i tekhnika; 1995. 582 p. Russian.
29. Uglyanets AV, Garbaruk DK, Shumak SV. *Dinamika i produktivnost' dubrav v usloviyakh otsutstviya khozyaistvennoi deyatel'nosti na yugo-vostoke Belorusskogo Poles'ya* [Dynamics and productivity of oak forests in the absence of economic activities in the south-east of the Belarusian Polesye]. *Trudy BGTU. Seriya 1, Lesnoe khozyaistvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovly-aemykh resursov*. 2022;2(258):55–66. Russian. DOI: 10.52065/2519-402X-2022-258-2-55–66.
30. Karpachevskii LO. *Les i lesnye pochvy* [Forest and forest soils]. Moscow: Lesnaya promyshlennost'; 1981. 264 p. Russian.
31. Loginov VF, Lysenko SA, Mel'nik VI. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, regulatory opportunities]. Minsk: Entsiklopediks; 2020. 264 p. Russian.
32. Brovka YuA, Buyakov IV. *Izmenenie gidrotermicheskogo koeffitsienta i povtoryaemosti ekstremal'nykh uslovii uvlazhneniya na territorii Belarusi v period potepleniya klimata* [Changes in the hydrothermal coefficient and in the frequency of extreme humidification conditions on the territory of Belarus during climate warming]. *Prirodopol'zovanie*. 2020;2:5–18. Russian. DOI: 10.47612/2079-3928-2020-2-5-18.
33. Marchenko YuD. *Pogodno-klimaticheskie usloviya v blizhnei zone Chernobyl'skoi AES* [Weather-climate conditions in the near zone of Chernobyl NPP]. *Ekosistemy i radiatsiya: aspekty sushchestvovaniya i razvitiya*. 2013:32–45. Russian.
34. Perevolotskaya TV. *Vertikal'naya migratsiya ¹³⁷Cs i ⁹⁰Sr v lesnykh pochvakh pod vliyaniem izmeneniya urovnya gruntovykh vod* [Vertical migration of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in forest soils under the influence of groundwater level changes]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2009;69:621–636. Russian.
35. Yurkevich ID. *Vydelenie tipov lesa pri lesoustroitel'nykh rabotakh* [Identification of forest types in forest managements operations]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1980. 120 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 20.01.2025.
Received by editorial board 20.01.2025.

УДК [616-006+616.15:616.155.011

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРИМЕНЕНИЮ МЕЗЕНХИМАЛЬНЫХ СТВОЛОВЫХ КЛЕТОК В ОНКОГЕМАТОЛОГИИ

**Е. А. ПРИМАКОВА¹⁾, С. И. КРИВЕНКО¹⁾, В. В. СМОЛЬНИКОВА¹⁾, Е. А. НАЗАРОВА¹⁾, А. А. СЫМАНОВИЧ¹⁾,
Е. Г. ЮРКИНА¹⁾, Н. И. ДЕДЮЛЯ¹⁾, И. А. РОМАНОВА¹⁾, Н. Ф. МИЛАНОВИЧ¹⁾**

¹⁾Минский научно-практический центр хирургии, трансплантологии и гематологии,
ул. Семашко, 8, 220045, г. Минск, Беларусь

Образец цитирования:

Примакова ЕА, Кривенко СИ, Смольникова ВВ, Назарова ЕА, Сыманович АА, Юркина ЕГ, Дедюля НИ, Романова ИА, Миланович НФ. Современные подходы к применению мезенхимальных стволовых клеток в онкогематологии. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;2:68–77.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-68-77>

For citation:

Prymakova EA, Krivenko SI, Smolnikova VV, Nazarova EA, Symanovich AA, Yurkina EG, Dedyulya NI, Romanova IA, Milanovich NF. Modern approaches to the use of mesenchymal stem cells in oncohematology. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;2:68–77. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-68-77>

Авторы:

Евгения Алексеевна Примакова – врач клинической лабораторной диагностики лаборатории клеточных биотехнологий.

Светлана Ивановна Кривенко – доктор медицинских наук, профессор; заместитель директора по научной работе.

Виктория Владимировна Смольникова – кандидат биологических наук, доцент; ведущий научный сотрудник научного отдела.

Екатерина Александровна Назарова – кандидат биологических наук, врач клинической лабораторной диагностики лаборатории клеточных биотехнологий.

Алла Александровна Сыманович – кандидат биологических наук, доцент; врач лабораторной диагностики лаборатории клеточных биотехнологий.

Екатерина Геннадьевна Юркина – старший научный сотрудник научного отдела.

Наталья Ивановна Дедюля – кандидат биологических наук, доцент; заведующий лабораторией клеточных биотехнологий.

Ирина Александровна Романова – научный сотрудник научного отдела.

Наталья Феодосьевна Миланович – кандидат медицинских наук, доцент; заведующий гематологическим отделением трансплантации костного мозга № 3.

Authors:

Evgeniya A. Prymakova, clinical laboratory diagnostics doctor of the cell biotechnology laboratory.

gane_sel@mail.ru

Svetlana I. Krivenko, doctor of science (medicine), professor; deputy director for research.

svtl_kr@tut.by

Viktorya V. Smolnikova, PhD (biology), docent; leading researcher of science department.

vsmolnikova2603@mail.ru

Ekaterina A. Nazarova, PhD (biology), clinical laboratory diagnostics doctor of the cell biotechnology laboratory.

k.nazarova-86@mail.ru

Alla A. Symanovich, PhD (biology), docent; clinical laboratory diagnostics doctor of the cell biotechnology laboratory.

aleftyna@tut.by

Ekaterina G. Yurkina, senior researcher of science department.

ekatherina999@mail.ru

Nataliya I. Dedyulya, PhD (biology), docent; head of the cell biotechnology laboratory.

nata_2010@tut.by

Iryna A. Romanova, researcher of science department.

romirina1978@gmail.com

Natalya F. Milanovich, PhD (medicine), docent; head of the hematology department of bone marrow transplantation No. 3.

nataly.milanovich@gmail.com

В последние десятилетия взгляды на этиологию и патогенез гемобластозов изменились. Все большее этиологическое значение приобретают неблагоприятные экологические факторы среды (физические и химические). Стратегия и тактика лечения онкогематологических заболеваний постоянно совершенствуется, а трансплантация гемопоэтических стволовых клеток остается «золотым стандартом» в терапии данной патологии. Основным ограничением трансплантации гемопоэтических стволовых клеток является развитие одного из самых тяжелых осложнений – реакции «трансплантат против хозяина». Клеточная терапия, ведущая роль в которой отводится мезенхимальным стволовым клеткам, на сегодняшний день является второй линией терапии данного состояния после кортикостероидов. Для повышения эффективности лечения этого иммунопатологического состояния необходима оптимизация подхода к выбору биомедицинского клеточного продукта на основе мезенхимальных стволовых клеток. В настоящем исследовании проанализировано изменение субпопуляционного состава лимфоцитов реципиентов аллогенных гемопоэтических стволовых клеток с признаками реакции «трансплантат против хозяина» при их совместном культивировании с мезенхимальными стволовыми клетками, полученными от разных доноров. Было показано, что культуры мезенхимальных стволовых клеток, полученные от разных доноров, обладают различным по степени выраженности иммунорегуляторным потенциалом. Предложен метод, который позволяет подобрать наиболее подходящий по иммунологическим характеристикам биомедицинский клеточный продукт на основе мезенхимальных стволовых клеток для клинического применения реакции «трансплантат против хозяина». Анализ эффективности предложенного метода проводился при использовании результатов иммунофенотипирования лимфоцитов 12 реципиентов аллогенных гемопоэтических стволовых клеток с клиническими проявлениями РТПХ, проходившими лечение на базе ГУ «МНПЦ ХТ и Г».

Ключевые слова: реакция «трансплантат против хозяина»; мезенхимальные стволовые клетки; биомедицинский клеточный продукт; субпопуляционный состав лимфоцитов.

MODERN APPROACHES TO THE USE OF MESENCHYMAL STEM CELLS IN ONCOHEMATOLOGY

*E. A. PRYMAKOVA^a, S. I. KRIVENKO^a, V. V. SMOLNIKOVA^a, E. A. NAZAROVA^a,
A. A. SYMANOVICH^a, E. G. YURKINA^a, N. I. DEDYULYA^a, I. A. ROMANOVA^a, N. F. MILANOVICH^a*

*^aMinsk Scientific and Practical Center for Surgery, Transplantology and Hematology,
7 Siamashka Street, Minsk 220045, Belarus*

Corresponding author: E. A. Prymakova (gane_sel@mail.ru)

In recent decades, views on etiology and pathogenesis of hemoblastosis have changed significantly. Unfavorable environmental factors (both physical and chemical) are becoming increasingly important etiologically. The strategy and tactics of treatment of oncohematological diseases are constantly being improved, and hematopoietic stem cell transplantation remains the «gold standard» in the treatment of this pathology. The main limitation of hematopoietic stem cell transplantation is the development of one of the most severe complications, the graft-versus-host disease. Cell therapy, in which mesenchymal stem cells play a leading role, is currently the second line of therapy for this condition after corticosteroids. It is necessary to optimize the approach to choosing a biomedical cell product based on mesenchymal stem cells in order to increase the effectiveness of cell therapy. The present study analyzes changes in the subpopulation composition of lymphocytes from recipients of allogeneic hematopoietic stem cells with signs of a graft-versus-host disease when they are co-cultured with mesenchymal stem cells obtained from different donors. It has been shown that cultures of mesenchymal stem cells obtained from different donors have different immunoregulatory potential. A method is proposed that makes it possible to select the most suitable biomedical cell product based on mesenchymal stem cells in terms of immunological characteristics for the clinical application of the graft-versus-host reaction. The analysis of the effectiveness of the proposed method was carried out using the results of immunophenotyping of lymphocytes from 12 recipients of allogeneic hematopoietic stem cells with clinical manifestations of GVHD treated at the State Institution «MSPC ST and H».

Keywords: graft-versus-host disease; mesenchymal stem cells; biomedical cell product; subpopulation composition of lymphocytes.

Введение

Онкогематологические заболевания (гемобластозы) представляют собой группу неоплазий, возникающих из кроветворной и лимфоидной ткани. Общая заболеваемость гемобластозами составляет 25–30 на 100 тыс. населения. Среди этиологических факторов, приводящих к развитию гемобластозов особое значение принадлежит экологическим факторам, в том числе ионизирующей радиации, другим видам облучения, химическим веществам (бензолу и его производным), а также цитостатическим лекарственным препаратам, РНК- и ДНК-онковирусам.

Несмотря на значительный прогресс в терапии гемобластозов, аллогенная трансплантация гемопоэтических стволовых клеток (аллоТГСК) остается основным методом лечения в онкогематологии. Однако аллоТГСК связана с развитием ряда тяжелых иммунологических осложнений, одно из ведущих мест среди которых занимает реакция «трансплантат против хозяина» (РТПХ). Около 50 % пациентов с резистентными к лечению формами РТПХ погибают, как правило, вследствие ассоциированных с этим процессом инфекций [1–3].

В настоящее время проводится поиск новых стратегий лечения РТПХ, включающих клеточную терапию, ведущую роль в которой занимают мезенхимальные стволовые клетки (МСК) [4–7]. Многочисленные исследования убедительно демонстрируют, что МСК *in vitro* способны регулировать функции различных иммунокомпетентных клеток (ИСК), участвующих в развитии РТПХ, особенно они вовлечены в супрессию Т-клеточной пролиферации и дифференцировки дендритных клеток, что делает МСК важным терапевтическим орудием в профилактике и лечении РТПХ [8–12].

Следует отметить, что иммуномодулирующие функции МСК реализуются не посредством действия какой-то конкретной молекулы, а с помощью сложной взаимозависимой иммунорегуляторной сети, взаимодействие клеток и молекул в которой зависит от воспалительного статуса микроокружения МСК [13].

Несмотря на то что применение МСК в качестве второй линии терапии при стероид-резистентной РТПХ вошло в рутинную практику, механизмы взаимодействия МСК и иммунокомпетентных клеток еще до конца не изучены и иногда кардинально отличаются в исследованиях различных авторов [14], а эффект, получаемый от клеточной терапии, не всегда предсказуем.

Противоречивые данные об эффективности клеточной терапии РТПХ заставляют исследователей проводить глубокий анализ клинических испытаний с применением МСК [15; 16]. Различия в выборе донора, источнике получения, методах культивирования, пролиферативном потенциале МСК, а также в количестве клеток, кратности их введения и в показаниях для терапии в исследованиях разных авторов не позволяют эффективно сравнить их между собой.

Так, группа ученых продемонстрировала, что существуют различия в культурах МСК, полученных от доноров аналогичного возраста и пола как по пролиферативному потенциалу, так и по иммуномодулирующим свойствам [17]. Отмечалось также, что «донорский фактор» играет далеко не последнюю роль в биологической изменчивости МСК, что в конечном итоге может определить эффективность клеточной терапии.

Однако не только различия в иммунорегуляторном потенциале различных культур МСК, но и в микроокружении, в которое попадают эти клетки, влияет на эффективность проводимой клеточной терапии. В экспериментальных условиях было показано, что при праймировании интерфероном-гамма МСК способны выполнять функции антиген-презентирующих клеток (АПК) и презентировать антигены Т-лимфоцитам [18]. Таким образом, эффект от клеточной терапии во многом может зависеть от условий культивирования МСК (присутствие в культуральной среде интерферона-гамма, фактора некроза опухоли альфа), а также от микроокружения, в которое они впоследствии попадают (про/противовоспалительное).

Цель исследования – оптимизация подхода к выбору биомедицинского клеточного продукта на основе МСК, используемого в комплексной терапии РТПХ. Для реализации цели проводилась оценка изменения субпопуляционного состава лимфоцитов реципиентов аллогенных гемопоэтических стволовых клеток без проявлений и с проявлениями острой РТПХ при их совместном культивировании с МСК, полученными от различных доноров.

Материалы и методы исследования

Материалы исследования: 1) мезенхимальные стволовые клетки, выделенные из жировой ткани и костного мозга человека; 2) моноклеарная фракция периферической крови реципиентов аллогенных гемопоэтических стволовых клеток (в период зафиксированной отстройки кроветворения без клинических признаков РТПХ и при появлении признаков оРТПХ).

Выделение и культивирование мезенхимальных стволовых клеток из жировой ткани. Выделение МСК из жировой ткани проводили по разработанному ранее протоколу с некоторыми модификациями¹. Параумбиликальную жировую ткань, иссеченную стерильными ножницами, смешивали с равным объемом стерильного фосфатно-солевого буфера и центрифугировали в течение 10 мин при 1500 об./мин при комнатной температуре. Образовавшийся поверх PBS слой адипоцитов собирали в стерильные полипропиленовые центрифужные пробирки объемом 50 мл. Полученную суспензию смешивали с равным объемом 0,06 % раствора коллагеназы I типа и инкубировали в течение 60 мин при температуре 37 °С и легком помешивании, после чего фермент нейтрализовали добавлением к смеси равного объема среды Игла в модификации Дульбекко (DMEM), содержащей 10 % эмбриональной телячьей сыворотки. Полученную

¹МПК C12N5/0775 (20101863). Способ выделения мезенхимальных стволовых клеток: патент 18051 Респ. Беларусь / С. И. Кривенко, Е. С. Бузук, Н. И. Дедюля; дата публ.: 28.02.2014.

смесь центрифугировали в течение 10 мин при 4000 об./мин при комнатной температуре. Осадок собирали и ресуспендировали в 50 мл среды DMEM. Процедуру центрифугирования повторяли (10 мин при 1500 об./мин при комнатной температуре). Осадок ресуспендировали в 10–15 мл среды для культивирования МСК. Подсчет клеток производили по стандартной методике с уксусной кислотой, подкрашенной метиленовым синим. Оценку жизнеспособности клеток проводили по общепринятой методике по исключению трипанового синего. Клеточную суспензию доводили средой для культивирования МСК до посевной концентрации и высевали в культуральные флаконы. Через 48 ч инкубации (37 °C, 5 % CO₂, 90 % влажность) неадгезировавшие к поверхности флакона клетки смывали стерильным PBS и заполняли флаконы специализированной средой для культивирования МСК. Замену среды в объеме ½ от первоначального производили каждые 3–4 дня до достижения клетками 70–80 % конfluence.

Выделение и культивирование МСК из пунктата костного мозга. Для выделения моноклеаров из костного мозга человека пунктат костного мозга (25–50 мл) после добавления равного объема фосфатного буферного раствора, центрифугировали в течение 10 мин при 1500 об./мин. Клеточный осадок ресуспендировали в 50 мл стерильного фосфатного буфера и наслаивали на градиент плотности Ficoll-Paque ($\rho = 1,077$) в соотношении 3:1. Центрифугировали 30 мин при 1500 об./мин. Кольцо моноклеаров переносили в пробирку, содержащую полную среду DMEM (10% ЭТС, 1 % антибиотика, 1 % глутамин) и двукратно отмывали центрифугированием. Полученные клетки ресуспендировали в среде DMEM, содержащей 10 % специализированной сыворотки (сапплемент), 1% антибиотика и 1 % глутамин, а затем засевали в концентрации 900–1200 тыс. клеток/см² площади поверхности в стерильные пластиковые флаконы для адгезивных культур.

Через 48 ч производили смену культуральной среды для удаления неприкрепившихся клеток. В дальнейшем смену среды производили на каждые четвертые сутки.

Морфологический анализ культур клеток. Культуры клеток исследовали на универсальном инвертированном микроскопе (*Micros*, Австрия и *Nikon*, Япония) с применением методов фазового контраста.

Выделение и культивирование лимфоцитов периферической крови. Выделение лимфоцитов периферической крови проводили по общепринятой методике: 5–10 мл периферической крови смешивали с равным объемом стерильного PBS и наслаивали на градиент плотности Ficoll-Paque ($\rho = 1,077$) в соотношении 3:1. Центрифугировали 30 мин при 1500 об./мин при комнатной температуре. Кольцо моноклеаров переносили в пробирку объемом 15 мл, содержащую стерильный фосфатный буфер. Моноклеарные клетки отмывали центрифугированием в течение 10 мин при 1500 об./мин при комнатной температуре. Клеточный осадок ресуспендировали в 5 мл полной среды RPMI-1640, содержащей 10 % эмбриональной телячьей сыворотки, 1 % антибиотика и 1 % L-глутамин. Подсчет клеток производили по стандартной методике с уксусной кислотой, подкрашенной метиленовым синим. Клеточную суспензию помещали в стерильный культуральный флакон для суспензионных культур с газопроницаемой крышкой. Флакон с культурой помещали в CO₂-инкубатор (37 °C, 5 % CO₂, 90 % влажность).

Определение фенотипа мезенхимальных стволовых клеток и субпопуляционного состава лимфоцитов методом проточной цитофлуориметрии. Для определения мезенхимальных стволовых клеток методом проточной цитофлуориметрии использовали следующую панель моноклональных антител (МКАТ): CD 45 PC7, CD 34 APC, CD 105 PE, CD 90 FITC, CD 13 PE, HLA-DR, CD 73 PE, CD 29 APC, CD 31 FITC (Beckman Coulter).

Для определения субпопуляционного состава лимфоцитов использовалась стандартная панель МКАТ, которая позволяла идентифицировать следующие субпопуляции: Т-лимфоциты (CD3⁺), В-лимфоциты (CD19⁺), натуральные киллеры (CD16⁺CD56⁺), Т-хелперы (CD3⁺CD4⁺), цитотоксические Т-лимфоциты (CD3⁺CD8⁺), активированные Т-хелперы (CD4⁺DR⁺), активированные цитотоксические Т-лимфоциты (CD8⁺DR⁺), Т-натуральные киллеры (CD3⁺CD16⁺CD56⁺), Т-регуляторные лимфоциты (CD4⁺CD25⁺CD127⁺).

К суспензии клеток (0,5–1 млн клеток) добавляли МКАТ в объеме, согласно рекомендации фирмы производителя и 100 мкл PBS + 1 % BSA, инкубировали в темноте 30 мин при $t = 4$ °C. После инкубации клетки дважды отмывали центрифугированием 1500 об./мин 5 мин в PBS и фиксировали 1 % параформальдегидом.

Загрузка образцов проводилась на проточном цитофлуориметре FACSCanto (Becton Dickinson), оснащенном двумя лазерами: 488 и 630 нм, что позволяет оценить клетку по шести параметрам одновременно. Учет проводился в рабочей программе FACSDiva.

Постановка совместных культур МСК и лимфоцитов периферической крови. Для экспериментов по со-культивированию МСК рассевали в ячейки 6-ти и 24-луночных планшетов по 5000 клеток/см². На 4–5 сутки в те же ячейки вносили лимфоциты, выделенные из крови реципиентов аллоген (по 500 тыс. клеток в лунку). Схема представлена на рис. 1.

Со-культивирование проводили в течение 3–4 суток в среде DMEM с добавлением 10 % эмбриональной телячьей сыворотки (Gibco, Life technologies). Контролем служили нестимулированные лимфоциты тех же пациентов, культивированные в отсутствие МСК. Все эксперименты были поставлены в 3–5 повторах.

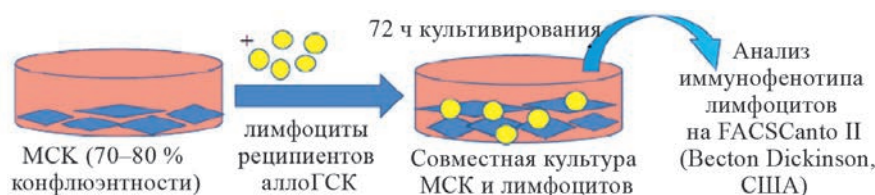


Рис. 1. Схема постановки совместных культур МСК и лимфоцитов реципиентов аллоГСК с РТПХ и без проявлений РТПХ

Fig. 1. Scheme of mixed cultures MSCs and lymphocytes of alloHSCT recipients with GVHD and without manifestations of GVHD

Статистическая обработка данных. Статистическую обработку проводили с помощью пакета прикладных программ *STATISTICA (Version 6.0, StatSoft Inc.)* для медико-биологических исследований и *Microsoft Excel*. Параметры распределения количественных переменных, отличных от нормального, представляли в виде медианы с 25 и 75 % квантилями. Для сравнительного анализа применяли непараметрические методы статистики: для сравнения двух независимых групп по одной количественной переменной использовали Mann – Whitney U-test. Различия считали достоверными при значении $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждение

Так как в настоящее время клеточная терапия РТПХ вошла в рутинную практику ГУ «МНПЦ ХТ и Г», а количество пациентов с данной патологией неуклонно растет, актуальной задачей по-прежнему остается поиск путей повышения эффективности проводимой клеточной терапии.

Использование в комплексной терапии аллогенного БМКП обладает рядом преимуществ перед аутологичным. Во-первых, позволяет существенно сократить сроки ожидания БМКП (2 ч вместо 2–3 недель), что является определяющим в терапии таких острых состояний, как РТПХ. Во-вторых, дает возможность выбрать наиболее подходящую по иммунологическим характеристикам культуру МСК, учитывая особенности конкретного пациента.

С 2010 г. на базе УЗ «9-я ГКБ» (с 2018 г. по настоящее время ГУ «МНПЦ ХТ и Г») создан и функционирует Банк мезенхимальных стволовых клеток, в фонде которого насчитывается более 100 образцов МСК, полученных от разных доноров. С совершенствованием методов культивирования МСК появилась возможность среди множества образцов выбрать наиболее подходящий для терапии РТПХ не только исходя из его клеточности, пассажа и источника получения, но и учитывая его иммуномодулирующие свойства.

В опубликованном нами ранее исследовании [19] было показано, что у реципиентов аллоГСК с РТПХ детектируются достоверно более высокие уровни ФНО- α ($p = 0,019$, Mann – Whitney U-test), ИЛ-8 ($p = 0,0005$, Mann – Whitney U-test) и низкие уровни ИЛ-17A ($p = 0,02$, Mann – Whitney U-test) и ИФН- γ ($p = 0,035$, Mann – Whitney U-test) по сравнению со здоровыми донорами. Данный факт свидетельствует о наличии аллореактивного микроокружения, в которое предстоит попасть МСК. Поэтому представляется нецелесообразным изучение иммуномодулирующих свойств МСК в контексте РТПХ в совместных культурах с лимфоцитами здоровых доноров, чему посвящено большинство публикаций.

В данном исследовании оценивали изменение субпопуляционного состава лимфоцитов реципиентов аллогенных гемопоэтических стволовых клеток без проявлений и с проявлениями острой РТПХ при их совместном культивировании с МСК, полученными от различных доноров. Для реализации данной задачи было поставлено 22 культуры лимфоцитов (из них – 14 от реципиентов с РТПХ и 8 – без проявлений РТПХ в период отстройки кроветворения) и 33 совместные культуры на подложке из МСК жировой ткани (МСК ЖТ) и костного мозга (КМ) (20 – от реципиентов с РТПХ и 13 – без проявлений РТПХ). Лимфоциты добавляли к культурам МСК КМ и ЖТ при достижении МСК 70 % конfluэнтности и культивировали в течение 3–4 суток. На рис. 2 представлена микрофотография совместной культуры лимфоцитов и МСК.



Рис. 2. Морфологические характеристики совместной культуры лимфоцитов и МСК, 4 дня культивирования, $\times 100$, фазовый контраст

Fig. 2. Morphological characteristics of mixed culture of lymphocytes and MSCs, 4 days of cultivation, $\times 100$, phase contrast

При анализе данных, полученных при иммунофенотипировании лимфоцитов, культивированных без и на подложке из МСК, при РТПХ была выявлена тенденция к уменьшению количества Т-лимфоцитов в популяции, культивированной на подложке МСК ЖТ и КМ (85 [45; 97,4] %, $n = 20$) по сравнению с лимфоцитами, культивированными без подложки (95,2 [59,9; 98,6] %, $n = 20$). Однако данные различия не были статистически значимы (табл.1). Аналогичная тенденция к уменьшению процентного соотношения Т-лимфоцитов наблюдалась при совместном культивировании с МСК лимфоцитов реципиентов аллоГСК без признаков РТПХ (табл. 2).

Таблица 1

Субпопуляционный состав лимфоцитов реципиентов аллоГСК с РТПХ при совместном культивировании с МСК

Table 1

Subpopulations of lymphocytes in recipients of alloHSCT with GVHD during co-cultivation with MSCs

Субпопуляции лимфоцитов	Лимфоциты реципиентов с РТПХ ($n = 20$)	Лимфоциты реципиентов с РТПХ на подложке из МСК ($n = 20$)	Уровень значимости (Mann – Whitney U-test)
CD3 ⁺	95,2 [59,9; 98,6] %	85 [45; 97,4]	$p = 0,17$
CD16 ⁺ CD56 ⁺	6 [1,2;32,5] %	13 [2,2;46,8] %	$p = 0,22$
CD4 ⁺ CD25 ⁺ CD127 ⁻ от CD4 ⁺	2,03 [0; 8,35] %	3,03 [0; 9] %	$p = 0,16$
CD3 ⁺ CD8 ⁺	34,05 [6,7; 57,4] %	31,4 [15,1; 54,8] %	$p = 0,53$
CD8 ⁺ DR ⁺	3,1 [1,1; 18,6] %	3,1 [1,1; 26,1] %	$p = 0,52$

Таблица 2

Субпопуляционный состав лимфоцитов реципиентов аллоГСК без РТПХ при совместном культивировании с МСК

Table 2

Subpopulations of lymphocytes in recipients of alloHSCT without GVHD during co-cultivation with MSCs

Субпопуляции лимфоцитов	Лимфоциты реципиентов без РТПХ ($n = 13$)	Лимфоциты реципиентов без РТПХ на подложке из МСК ($n = 13$)	Уровень значимости (Mann – Whitney U-test)
CD3 ⁺	84,3 [46,1; 92,4] %	80,8 [43,4; 98,6]	$p = 0,92$
CD16 ⁺ CD56 ⁺	9,8 [4,2; 49,1] %	11,8 [1; 50] %	$p = 0,84$
CD4 ⁺ CD25 ⁺ CD127 ⁻ от CD4 ⁺	3,42 [0,6; 16] %	5,4 [0,8; 22] %	$p = 0,14$
CD3 ⁺ CD8 ⁺	25,8 [4,1; 61,2] %	24,4 [5,1; 59,4] %	$p = 0,80$
CD8 ⁺ DR ⁺	3,6 [0,3; 18,1] %	4,2 [0; 10,8] %	$p = 0,65$

Так как решающую роль в развитии РТПХ играют цитотоксические лимфоциты донора (CD3⁺CD8⁺-лимфоциты), целесообразным было оценить влияние МСК на данную субпопуляцию лимфоцитов. В табл. 1 и 2 отражено изменение процентного соотношения субпопуляции CD3⁺CD8⁺-лимфоцитов, а также активированных CD8⁺DR⁺ в интактных и совместных культурах при РТПХ и при отстройке кроветворения.

Отсутствие статистически значимых различий ($p > 0,05$) по процентному соотношению ключевых субпопуляций лимфоцитов, имеющих значение при РТПХ, при культивировании на подложке из МСК можно объяснить как различными иммуномодулирующими свойствами каждой конкретной культуры МСК и, соответственно, способностью культуры модулировать иммунный ответ, так и различной степенью активации микроокружения МСК (в данном случае – лимфоцитов от реципиентов с РТПХ и без).

Так, при культивировании лимфоцитов одного и того же реципиента одновременно на подложках из двух различных культур МСК наблюдали разнонаправленный эффект. Количество CD3⁺CD8⁺ клеток изменялось на подложке из различных культур МСК в равной степени, в то время как процентное соотношение CD3⁺CD4⁺HLA-DR⁺, CD3⁺CD8⁺HLA-DR⁺ и CD3⁺CD16⁺CD56⁺ клеток на подложке из различных культур МСК отличалось практически в 2 раза (рис. 3).

Полученные данные свидетельствуют о том, что культуры МСК, полученные от разных доноров, обладают различным по степени выраженности иммунорегуляторным потенциалом.

При анализе данных, полученных при культивировании лимфоцитов от 2-х реципиентов аллоГСК с признаками РТПХ и без на одной и той же культуре МСК ЖТ РЗ, при имеющейся общей тенденции процентное соотношение субпопуляций лимфоцитов отличалось на этой культуре МСК в несколько раз (рис. 4).

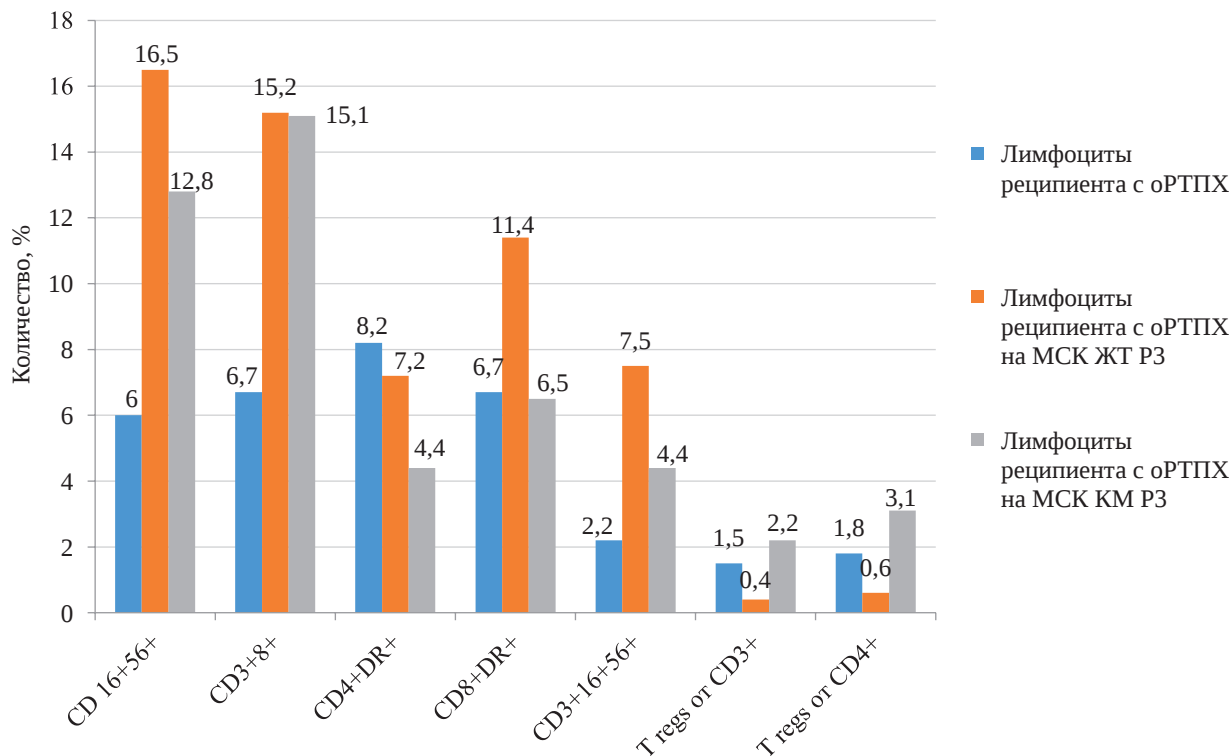


Рис. 3. Изменение субпопуляционного состава лимфоцитов реципиента аллоГСК с признаками оРТПХ на подложке из 2-х различных культур МСК

Fig. 3. Changes in lymphocytes' subpopulation of alloHSCT recipient with signs of aGVHD on a substrate of 2 different MSC cultures

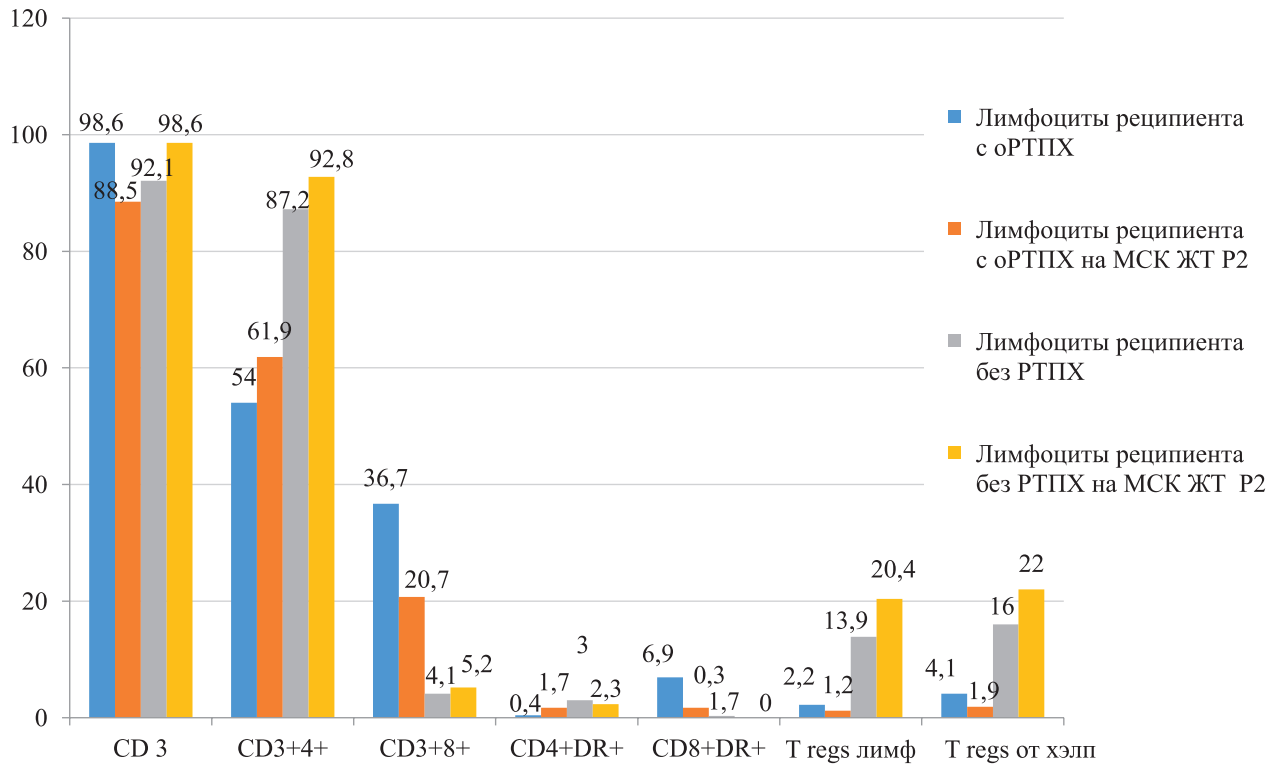


Рис. 4. Изменение субпопуляционного состава лимфоцитов 2-х реципиентов аллоГСК с признаками оРТПХ и без на подложке из одной и той же культуры МСК

Fig. 4. Changes in lymphocytes' subpopulation of 2 alloHSCT recipients with and without signs of aGVHD on a substrate of the same MSC culture

Таким образом, аллореактивное микроокружение влияет на способность МСК модулировать иммунный ответ и перераспределять $CD4^+$ и $CD8^+$ субпопуляции Т-лимфоцитов. Для повышения эффективности клеточной терапии необходим персонифицированный подход к подбору БМКП на основе МСК.

Культивирование лимфоцитов реципиентов аллоГСК с РТПХ одновременно на подложке из нескольких культур МСК представляют собой простой *in vitro* способ для моделирования влияния МСК на аллореактивные лимфоциты реципиента с РТПХ.

Предложенный метод был апробирован при подборе оптимального БМКП на основе МСК для комплексной терапии РТПХ на 26 реципиентах аллоГСК с клиническими проявлениями РТПХ, проходившими лечение на базе ГУ «МНПЦ ХТ и Г».

Поскольку РТПХ является острым иммунопатологическим состоянием, требующим незамедлительной терапии, первое введение БМКП осуществлялось без постановки совместных культур лимфоцитов реципиента аллоГСК с МСК. Подбор МСК для подготовки БМКП проводили при появлении первых клинических симптомов РТПХ у пациентов, которым ранее не проводилась клеточная терапия. Для этого несколько культур МСК (2–4) отбирались из Банка мезенхимальных стволовых клеток и высевались в 24-луночные планшеты для постановки совместных культур с лимфоцитами. Для подбора МСК требовалось от 4 до 6 дней, что соответствовало временному промежутку до следующего введения БМКП.

Количество введений БМКП у данных пациентов варьировало от 1 до 9 (при медиане = 3, $n = 26$). Одно введение получили 9 пациентов, 2 введения – 3 пациента, 3 введения и более – 14 пациентов. Кратность введения зависела от тяжести и формы РТПХ, а также от выбора подходящего БМКП. Анализ эффективности предложенного метода проводили, используя результаты иммунофенотипирования лимфоцитов 12 пациентов, так как только 12 из 26 пациентов проходили терапию в стационаре достаточно продолжительное для анализа время. По результатам иммунофенотипирования предпочтительней считалось использование культуры МСК для подготовки БМКП со следующими характеристиками:

- снижение процентного соотношения $CD3^+$ -лимфоцитов на подложке из МСК по сравнению с интактными мононуклеарами периферической крови (МНК ПК);
- снижение процентного соотношения $CD3^+CD8^+$ -лимфоцитов на подложке из МСК по сравнению с интактными МНК ПК;
- снижение процентного соотношения $CD8^+HLA-DR^+$ -лимфоцитов на подложке из МСК по сравнению с интактными МНК ПК;
- увеличение процентного соотношения $CD4^+CD25^+CD127^-$ -лимфоцитов на подложке из МСК по сравнению с интактными МНК ПК.

Согласно утвержденной МЗ РБ инструкции по применению «Методы медицинской профилактики и терапии реакции “трансплантат против хозяина” после аллогенной трансплантации гемопоэтических стволовых клеток» от 23.12.2022 г. рег. № 142–1222 показаниями к назначению клеточной терапии пациентам из группы высокого риска по развитию РТПХ являются увеличение количества $CD3^+ > 75\%$, увеличение количества $CD3^+CD4^+ > 45\%$, увеличение количества $CD3^+CD8^+ > 40\%$, увеличение количества активированных $CD3^+HLA-DR^+$ Т лимфоцитов $> 11\%$.

В нашем исследовании 5 из 12 пациентов (42 %) соответствовали данным иммунологическим критериям. Двое из этих 5-ти пациентов умерли вследствие нарастания тяжести РТПХ (кишечная форма), несмотря на продолжительную клеточную терапию (кратность 5 и 9 раз). Следует отметить, что данным пациентам удалось ввести подходящий по иммунофенотипическим параметрам БМКП только по 1 разу, несмотря на то что для подбора использовали 15 различных культур МСК. Положительный клинический эффект длился после введения БМКП у этих пациентов до 8 дней.

Всего из 12 пациентов кожная форма РТПХ была у 7 пациентов, кишечная – у 2-х, кожная и кишечная – у 3-х пациентов. По результатам подбора МСК 7 пациентов получили БМКП, полностью соответствующий установленным иммунофенотипическим критериям, 2 пациента – частично соответствующий и 3-м пациентам (2 из которых умерли) не удалось подобрать БМКП с оптимальными параметрами.

Из 7 пациентов, получивших подобранный БМКП, у шестерых купирование симптомов РТПХ произошло за 1–4 дня (кожная форма РТПХ – 5 пациентов, кожная и кишечная – 1 пациент), у одного пациента прошел месяц до закрепления эффекта (кожная и кишечная форма РТПХ).

У 2 пациентов, получивших частично соответствующий БМКП, купирование симптомов РТПХ произошло через 11 (кишечная форма) и 30 дней (кожная форма). Этим пациентам дважды вводили подобранные БМКП.

Анализируя полученные данные, можно заключить, что предложенный метод позволяет выбрать наиболее подходящий по иммунологическим характеристикам БМКП на основе МСК для клинического применения при РТПХ и может быть использован для персонификации и оптимизации клеточной терапии РТПХ.

Заключение

Культуры МСК, полученные от разных доноров, обладают различным по степени выраженности иммунорегуляторным потенциалом.

Для повышения эффективности клеточной терапии РТПХ необходим персонализированный подход к подбору биомедицинского клеточного продукта на основе МСК.

Культивирование лимфоцитов реципиентов аллогенских с РТПХ одновременно на подложке из нескольких культур МСК представляет собой простой *in vitro* метод для моделирования влияния МСК на аллореактивные лимфоциты реципиента с РТПХ и позволяет оптимизировать клеточную терапию РТПХ.

Библиографические ссылки

1. Arai S, Margolis J, Zahurak M. Poor outcome in steroid-refractory graft-versus-host disease with antithymocyte globulin treatment. *Biology and Blood Marrow Transplantation*. 2002;8:155–160.
2. Levine JE, Logan B, Wu J. Graft-versus-host disease treatment: predictors of survival. *Biology and Blood Marrow Transplantation*. 2010;16:1693–1699.
3. Westin JR, Saliba RM, De Lima M. Steroid-refractory acute GVHD: Predictors and outcomes. *Advances in Hematology*. 2011;2011:8.
4. Dotoli GM, De Santis GC, Orellana MD. Mesenchymal stromal cell infusion to treat steroid-refractory acute GvHD III/IV after hematopoietic stem cell transplantation. *Bone Marrow Transplantation*. 2017;52(6):859–862.
5. Ball LM, Bernardo ME, Roelofs H. Multiple infusions of mesenchymal stromal cells induce sustained remission in children with steroid-refractory, grade III-IV acute graft-versus-host disease. *British Journal of Haematology*. 2013;163:501–509.
6. Le Blanc K, Rasmusson I, Sundberg B. Treatment of severe acute graft-versus-host disease with third party haploidentical mesenchymal stem cells. *Lancet*. 2004;363(2004):1439–1441.
7. Le Blanc K, Frassonni F, Ball L. Mesenchymal stem cells for treatment of steroid-resistant, severe, acute graft-versus-host disease: a phase II study. *Lancet*. 2008;371(9624):1579–1586.
8. Yanez R, Lamana ML, Garcia-Castro J. Adipose tissue-derived mesenchymal stem cells have in vivo immunosuppressive properties applicable for the control of the graft-versus-host disease. *Stem Cells*. 2006;24:2582–2591.
9. DelaRosa O, Sa´nchez-Correa B, Morgado S. Human adipose-derived stem cells impair natural killer cell function and exhibit low susceptibility to natural killer-mediated lysis. *Stem Cells and Development*. 2012;21(8):1333–1343.
10. Glennie S, Soeiro I, Dyson PJ. Bone marrow mesenchymal stem cells induce division arrest anergy of activated T cells. *Blood*. 2005;105:2821–2827.
11. Nauta AJ, Kruisselbrink AB, Lurvink E. Mesenchymal stem cells inhibit generation and function of both CD34⁺-derived and monocyte-derived dendritic cells. *The Journal of Immunology*. 2006;177:2080–2087.
12. Corcione A, Benvenuto F, Ferretti E. Human mesenchymal stem cells modulate B-cell functions. *Blood*. 2006;107(1):367–372.
13. Salem HK, Thiemermann C. Mesenchymal stromal cells: Current understanding and clinical status. *Stem Cells*. 2010;28:585–596.
14. Nauta AJ, Fibbe WE. Immunomodulatory properties of mesenchymal stromal cells. *Blood*. 2007;110(10):3499–3506.
15. Munneke JM, Spruit MJA, Cornelissen AS. The Potential of Mesenchymal Stromal Cells as Treatment for Severe Steroid-Refractory Acute Graft-Versus-Host Disease. *Transplantation*. 2016;100(11):2309–2314.
16. Galipeau J, Sense´be´ L. Mesenchymal Stromal Cells: Clinical Challenges and Therapeutic Opportunities. *Cell Stem Cell*. 2018;22(6):824–833.
17. Maged G, Abdelsamed MA, Wang H. The potency of mesenchymal stem/stromal cells: does donor sex matter? *Stem Cell Research & Therapy*. 2024;15(1):112.
18. Carvalho AÉS, Sousa MRR, Alencar-Silva T. Mesenchymal stem cells immunomodulation: The road to IFN-γ licensing and the path ahead. *Cytokine & Growth Factor Reviews*. 201;47:32–42.
19. Примакова ЕА, Кривенко СИ, Сыманович АА. Цитокины плазмы крови как потенциальные биомаркеры реакции «трансплантат против хозяина» в раннем посттрансплантационном периоде. *Новости медико-биологических наук*. 2023;2:55–61.

References

1. Arai S, Margolis J, Zahurak M. Poor outcome in steroid-refractory graft-versus-host disease with antithymocyte globulin treatment. *Biology and Blood Marrow Transplantation*. 2002;8:155–160.
2. Levine JE, Logan B, Wu J. Graft-versus-host disease treatment: predictors of survival. *Biology and Blood Marrow Transplantation*. 2010;16:1693–1699.
3. Westin JR, Saliba RM, De Lima M. Steroid-refractory acute GVHD: Predictors and outcomes. *Advances in Hematology*. 2011;2011:8.
4. Dotoli GM, De Santis GC, Orellana MD. Mesenchymal stromal cell infusion to treat steroid-refractory acute GvHD III/IV after hematopoietic stem cell transplantation. *Bone Marrow Transplantation*. 2017;52(6):859–862.
5. Ball LM, Bernardo ME, Roelofs H. Multiple infusions of mesenchymal stromal cells induce sustained remission in children with steroid-refractory, grade III-IV acute graft-versus-host disease. *British Journal of Haematology*. 2013;163:501–509.
6. Le Blanc K, Rasmusson I, Sundberg B. Treatment of severe acute graft-versus-host disease with third party haploidentical mesenchymal stem cells. *Lancet*. 2004;363(2004):1439–1441.
7. Le Blanc K, Frassonni F, Ball L. Mesenchymal stem cells for treatment of steroid-resistant, severe, acute graft-versus-host disease: a phase II study. *Lancet*. 2008;371(9624):1579–1586.
8. Yanez R, Lamana ML, Garcia-Castro J. Adipose tissue-derived mesenchymal stem cells have in vivo immunosuppressive properties applicable for the control of the graft-versus-host disease. *Stem Cells*. 2006;24:2582–2591.
9. DelaRosa O, Sa´nchez-Correa B, Morgado S. Human adipose-derived stem cells impair natural killer cell function and exhibit low susceptibility to natural killer-mediated lysis. *Stem Cells and Development*. 2012;21(8):1333–1343.

10. Glennie S, Soeiro I, Dyson PJ. Bone marrow mesenchymal stem cells induce division arrest anergy of activated T cells. *Blood*. 2005;105:2821–2827.
11. Nauta AJ, Kruisselbrink AB, Lurvink E. Mesenchymal stem cells inhibit generation and function of both CD34+-derived and monocyte-derived dendritic cells. *The Journal of Immunology*. 2006;177:2080–2087.
12. Corcione A, Benvenuto F, Ferretti E. Human mesenchymal stem cells modulate B-cell functions. *Blood*. 2006;107(1):367–372.
13. Salem HK, Thiemermann C. Mesenchymal stromal cells: Current understanding and clinical status. *Stem Cells*. 2010;28:585–596.
14. Nauta AJ, Fibbe WE. Immunomodulatory properties of mesenchymal stromal cells. *Blood*. 2007;110(10):3499–3506.
15. Munneke JM, Spruit MJA, Cornelissen AS. The Potential of Mesenchymal Stromal Cells as Treatment for Severe Steroid-Refractory Acute Graft-Versus-Host Disease. *Transplantation*. 2016;100(11):2309–2314.
16. Galipeau J, Sense'be' L. Mesenchymal Stromal Cells: Clinical Challenges and Therapeutic Opportunities. *Cell Stem Cell*. 2018;22(6):824–833.
17. Maged G, Abdelsamed MA, Wang H. The potency of mesenchymal stem/stromal cells: does donor sex matter? *Stem Cell Research & Therapy*. 2024;15(1):112.
18. Carvalho AÊS, Sousa MRR, Alencar-Silva T. Mesenchymal stem cells immunomodulation: The road to IFN- γ licensing and the path ahead. *Cytokine & Growth Factor Reviews*. 201;47:32–42.
29. Primakova EA, Krivenko SI, Symanovich AA. *Citokiny plazmy krovi kak potencial'nye biomarkery reakcii «transplantat protiv hozjaina» v rannem posttransplantacionnom periode* [Plasma Cytokines as Potential Biomarkers of Graft-Versus-Host Disease in the Early Posttransplant Period]. *Novosti mediko-biologicheskikh nauk*. 2023;2:55–61. Russian.

Статья поступила в редколлегию 05.05.2025.
Received by editorial board 05.05.2025.

УДК 571.27–577.29

РОЛЬ БЕЛКА Dkk3 В РЕГУЛЯЦИИ ЦИТОТОКСИЧНОСТИ ЛИМФОЦИТОВ: СИСТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

А. А. СТРАХ¹⁾, А. В. ВЕЛИЧКО^{1), 2)}, Д. Б. НИЖЕГОРОВА^{1), 2)}, М. М. ЗАФРАНСКАЯ^{1), 2)}

¹⁾Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

²⁾Научно-исследовательский институт экспериментальной и клинической медицины,
Белорусский государственный медицинский университет,
пр. Дзержинского, 83, 220083, г. Минск, Беларусь

Изучение роли белка Dkk3 в регуляции цитотоксичности лимфоцитов является актуальным, малоизученным направлением в науке. Разобраться в молекулярно-генетических аспектах функционирования данного белка, а также выявить взаимосвязь между Dkk3 и иммунной системой человека представляется крайне непростой задачей для исследователей. Семейство белков Dickkopf разнообразно и включает пять белков. Dkk3 взаимодействует с сигнальным путем Wnt, что отличает данный белок от других членов Dkk. Кроме этого, белок имеет разнообразные биологические роли (предотвращает гипертрофию сердца и способствует дифференциации стволовых клеток). Он может выступать в качестве модулятора иммунной системы. Dkk3 играет важную роль в установлении периферической толерантности Т-клеток. В исследовании проведен систематический обзор научных публикаций базы данных PubMed, посвященных изучению роли Dkk3 в регуляции цитотоксичности лимфоцитов, опубликованных с 2020 по 2025 г. В ходе систематического обзора изучено 182 источника, из которых в процессе скрининга отобрана 41 статья, включенная в исследование. Поискные запросы и ключевые фразы содержали «Dkk3 как внеклеточный антагонист Wnt», «пути регуляции посредством Dkk3», «ген-супрессор опухолей», «онкоген», «взаимосвязь Dkk3 с субпопуляцией лимфоцитов», «цитотоксические лимфоциты». Систематический обзор позволит расширить область исследования по биологической роли Dkk3, в частности в регуляции цитотоксичности лимфоцитов для дальнейшего изучения и открытия новых направлений по данной теме исследования.

Ключевые слова: Dkk3; сигнальный путь Wnt; цитотоксические лимфоциты; онкоген; ген-супрессор опухолей.

Образец цитирования:

Страх АА, Величко АВ, Нижегородова ДБ, Зафранская ММ. Роль белка Dkk3 в регуляции цитотоксичности лимфоцитов: систематический обзор. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2025;2:78–87.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-78-87>

For citation:

Strakh AA, Vialichka AV, Nizheharodava DB, Zafranskaya MM. Role of Dkk3 protein in regulation of lymphocyte cytotoxicity: systematic review. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2025;2:78–87. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-78-87>

Авторы:

Алёна Андреевна Страх – магистрант кафедры иммунологии, факультет экологической медицины.

Алеся Валерьевна Величко – аспирант кафедры иммунологии¹⁾; младший научный сотрудник отдела иммунологии и биомедицинских технологий научно-исследовательской лаборатории²⁾.

Дарья Борисовна Нижегородова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры иммунологии¹⁾; ведущий научный сотрудник отдела иммунологии и биомедицинских технологий научно-исследовательской лаборатории²⁾.

Марина Михайловна Зафранская – доктор медицинских наук, профессор; заведующий кафедрой иммунологии¹⁾; главный научный сотрудник отдела иммунологии и биомедицинских технологий²⁾.

Authors:

Alena A. Strakh, master's student at the department of immunology, faculty of ecological medicine.

alenastrakh2003@gmail.com

Alesia V. Vialichka, graduate student at the department of immunology^a; junior researcher at the department of immunology and biomedicine technology, scientific research laboratory^b.

alesjswirskay@mail.ru

Darya B. Nizheharodava, PhD (biology), docent; associate professor at the department of immunology^a; leading researcher at the department of immunology and biomedicine technology, scientific research laboratory^b.

nzh@tut.by

Marina M. Zafranskaya, doctor of science (medicine), professor; head of the department of immunology^a; primary investigator at the department of immunology and biomedicine technology, scientific research laboratory^b.

zafranskaya@gmail.com

ROLE OF Dkk3 PROTEIN IN REGULATION OF LYMPHOCYTE CYTOTOXICITY: SYSTEMATIC REVIEW

A. A. STRAKH^a, A. V. VIALICHKA^{a, b}, D. B. NIZHEHARODAVA^{a, b}, M. M. ZAFRANSKAYA^{a, b}

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

^bResearch Institute of Experimental and Clinical Medicine, Belarusian State Medical University,
83 Dzierzhynsky Avenue, Minsk 220083, Belarus

Corresponding author: A. A. Strakh (alenastrakh2003@gmail.com)

The study of the role of the Dkk 3 protein in the regulation of lymphocyte cytotoxicity is an urgent, little-studied area in science. It is an extremely difficult task for researchers to understand the molecular and genetic aspects of the functioning of this protein, as well as to identify the relationship between Dkk3 and the human immune system. The Dickkopf protein family is diverse and includes five proteins. Dkk3 interacts with the Wnt signaling pathway, which distinguishes this protein from other Dkk members. In addition, Dkk3 has a variety of biological roles (prevents cardiac hypertrophy and promotes stem cell differentiation). This protein can act as a modulator of the immune system. Dkk3 plays an important role in establishing peripheral tolerance of T cells. This paper provides a systematic review of scientific publications in the PubMed database devoted to the study of the role of Dkk3 in the regulation of lymphocyte cytotoxicity, published from 2020 to 2025. During the systematic review, 182 sources were studied, from which 41 articles included in the study were selected during the screening process. The search queries and keywords contained «Dkk3 as an extracellular antagonist of Wnt», «regulatory pathways through Dkk3», «tumor suppressor gene», «oncogene», «relationship of Dkk3 with a subpopulation of lymphocytes», «cytotoxic lymphocytes». A systematic review will expand the field of research on the biological role of Dkk3, in particular on the role of Dkk3 in regulating lymphocyte cytotoxicity, for further study and discovery of new directions on this research topic.

Keywords: Dkk3; Wnt signaling pathway; cytotoxic lymphocytes; oncogene; tumor suppressor gene.

Введение

С каждым годом человечество обретает новые и масштабные проблемы, связанные с экологией. Ухудшение состояния окружающей среды может приводить к изменениям на генетическом и молекулярном уровнях. Взаимосвязь экологии и генетики достаточно сильная, так как эволюция человека шла через эволюцию его генотипа. Изучение влияния одной области науки на другую способствует пониманию механизмов нарушения генетических и молекулярных процессов, которые могут напрямую зависеть от состояния окружающей среды.

Dkk3 (Dickkopf WNT Signaling Pathway Inhibitor 3) представляет собой ген, кодирующий белок, который является членом семейства dickkopf. Секретируемый белок содержит два богатых цистеином участка и участвует в эмбриональном развитии посредством взаимодействия с сигнальным путем Wnt, что отличает данный белок от других членов Dkk. Он имеет разнообразные биологические роли, которые связаны с деградацией хряща, гипертрофией сердца, артериопротекцией, легочной вентилиацией и окислительным стрессом. Внутриклеточный и внеклеточный Dkk3 играет решающую роль в предотвращении гипертрофии сердца и способствует дифференциации стволовых клеток в сосудистые гладкомышечные клетки посредством активации нескольких внутриклеточных сигнальных путей. Dkk3 также может влиять на клеточные антиоксидантные защитные механизмы и защищать клетки от окислительного повреждения, однако все биологические роли данного белка не объяснены молекулярными механизмами [39].

Dkk3 активно изучается иммунологами в качестве модулятора иммунной системы. Он экспрессируется на самых высоких уровнях в таких иммунопривилегированных органах, как эмбрион, плацента, глаза и мозг, что совместимо с ролью Dkk3 в их иммунной толерантности. Обнаружено, что он играет жизненно важную роль в установлении периферической толерантности Т-клеток CD8. Это подтверждается наблюдением: экспрессия Dkk3 повышена в толерантных Т-клетках CD8, что снижает общую реактивность Т-клеток CD8 *in vitro*. Отмена функции Dkk3 *in vivo* приводит к нарушению толерантности, что способствует уничтожению опухолей, экспрессирующих целевой антиген, и к отторжению аутологических кожных трансплантатов [33].

Неконтролируемая реактивация сигнальных путей Wnt во взрослом организме посредством приобретения соматических генетических мутаций или эпигенетических аномалий лежит в основе злокачественной трансформации, прогрессирования опухолей и устойчивости раковых клеток к терапии. Ингибиторы сигнального пути Wnt тестируются в клинических испытаниях [40].

Актуальность данного исследования обусловлена нарастающим интересом к Dkk3 в качестве регулятора функции иммунной системы, являющейся индикаторной в плане оценки экологического прессинга на организм человека. Дальнейшие исследования позволят полностью охарактеризовать и понять сложное

взаимодействие между Dkk3 и иммунной системой, а также более детально изучить роль в регуляции функционирования клеток-предшественников и развитии опухолей.

Рассматривая роль Dkk3 в регуляции цитотоксичности лимфоцитов, можно будет познать новые или ранее изученные, но в другом контексте, возможности Dkk3 и иммунной системы, использовать полученные результаты в регенеративной медицине и иммуномодулирующей терапии. Таким образом, цель данного исследования – проведение систематического обзора литературных данных базы PubMed о современных представлениях роли Dkk3 в регуляции цитотоксичности лимфоцитов, опубликованных за период с 2020 по 2025 гг.

Материалы и методы исследования

В исследовании освещаются различные представления о роли Dkk3 в регуляции цитотоксичности лимфоцитов путем анализа сформировавшейся совокупности научных данных в базе PubMed. Отбор ограничен работами, которые опубликованы на английском языке за последние 5 лет. Для наиболее эффективного отбора статей использованы следующие поисковые запросы: «Dkk3 как внеклеточный антагонист Wnt», «пути регуляции посредством Dkk3», «ген-супрессор опухолей», «онкоген», «взаимосвязь Dkk3 с субпопуляцией лимфоцитов», «цитотоксические лимфоциты».

Аннотации доступных публикаций тщательно проанализированы для оценки их качества и актуальности. Кроме того, исследовались цели, методология, результаты и выводы каждой из отобранных статей. Обзор проведен в соответствии с требованиями руководства по предпочтительным элементам отчетности для систематических обзоров и метаанализов (англ. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, PRISMA) [37].

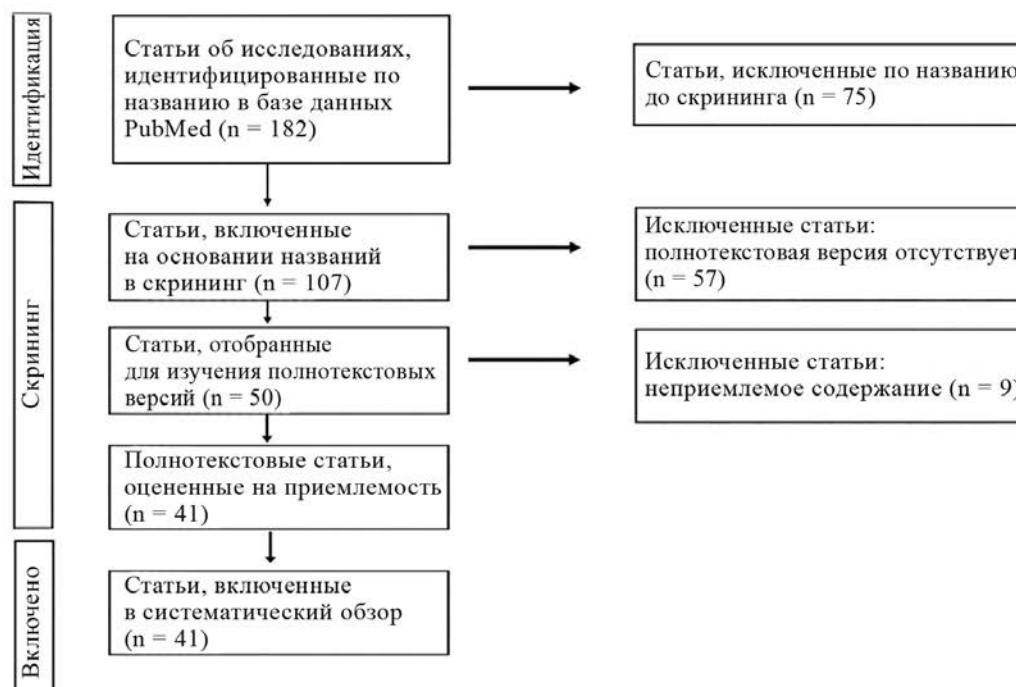


Рис. 1. Блок-схема отбора для систематического обзора (диаграмма Prisma)

Fig. 1. Selection flowchart for systematic review (Prisma diagram)

На данной блок-схеме (рис. 1) представлена динамика анализа информации на разных этапах систематического обзора: идентификация, количество статей, отобранных по названию; количество публикаций, прошедших первичный скрининг по названиям; количество отобранных полнотекстовых статей, оцененных на соответствие критериям; количество работ, включенных в обзор, а также количество исключенных публикаций, основанных на заголовках, отсутствии полнотекстовых версий и неприемлемом содержании.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате использования методологии проведения систематического обзора по изучению роли Dkk3 в регуляции цитотоксичности лимфоцитов отобрана 41 полнотекстовая статья, подходящих для обзора согласно критериям Prisma 2020: отбор публикаций по названиям и аннотациям, по наличию полного текста;

анализ содержания статей на приемлемость. Проведен систематический обзор литературных данных электронной базы PubMed о современных представлениях роли Dkk3 в регуляции цитотоксичности лимфоцитов, опубликованных за 2020–2025 гг. Статьи, включенные в обзор о роли Dkk3 в регуляции цитотоксичности лимфоцитов, классифицировали на 6 групп в зависимости от направления изучения: 1) Dkk3 как ген-супрессор опухолей; 2) Dkk3 в качестве онкогена; 3) пути регуляции посредством Dkk3; 4) антагонист Wnt; 5) взаимосвязь Dkk3 с субпопуляциями лимфоцитов; 6) регуляция цитотоксичности лимфоцитов посредством Dkk3.

Dkk3 – секретируемый белок, который содержит два богатых цистеином участка и участвует в эмбриональном развитии посредством взаимодействия с сигнальным путем Wnt. Экспрессия ДНК/РНК Dkk3 человека широко наблюдается в его нормальных тканях. Анализы методом нозерн-блоттинга показывают, что мРНК Dkk3 экспрессируется в мозге, сердце, легких, печени, поджелудочной железе, селезенке, почках, тонком кишечнике, толстой кишке, скелетных мышцах и плаценте. Среди них экспрессия Dkk3 особенно высока в сердце и мозге. Экспрессия мРНК и белка Dkk3 нарушается в широком спектре опухолей, включая глиому, рак желудка, колоректальный рак, гепатоцеллюлярный рак и др. Это снижение экспрессии мРНК, вызванное гиперметилованием промотора гена. Таким образом, Dkk3 считается потенциальным супрессором опухолей и фокусируется на терапевтической мишени при различных стадиях опухолевого процесса. Однако некоторые исследования показывают, что экспрессия белка Dkk3 повышается. Это предполагает специфичный для рака паттерн экспрессии и потенциальную альтернативную роль в его инвазии [41].

Dkk3 – внеклеточный секретируемый белок. Его внутриклеточная локализация наблюдается в цитоплазме, органеллах и эндоплазматическом ретикулуме. Существует три пути в сигнализации Wnt: путь Wnt/бета-катенин, путь планарной клеточной полярности и каскад Wnt/ Ca^{2+} . Путь Wnt/бета-катенин называется каноническим путем, а два последних – неканоническими путями (рис. 2).

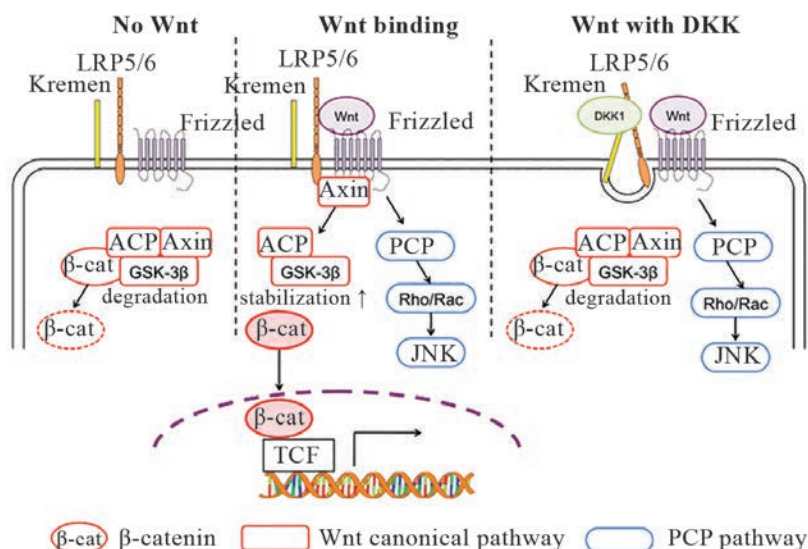


Рис. 2. Пути сигнализации Wnt

Fig. 2. Wnt signaling pathways

Активное изучение канонического сигнального пути приводит к появлению все больших доказательств сложной взаимосвязи канонического пути Wnt и клеточного цикла. Компоненты сигнального каскада Wnt действуют непосредственно на формирование митотического веретена. Также путь Wnt сильно активируется в митозе, свидетельствуя о том, что «митотическая Wnt-сигнализация» играет важную роль в организации программы клеточного деления и, таким образом, способствует клеточной пролиферации. Более того, сигнальный путь Wnt/β-катенина играет ключевую роль в поддержании плюрипотентности, а также в процессах перепрограммирования соматических клеток. В то же время путь Wnt/β-катенин играет важную роль и в процессе дифференцировки [23].

Для реализации канонического пути Wnt/бета-катенин необходимо присутствие специфических лигандов Wnt, которые связываются с рецепторами Frizzled и такими ко-рецепторами, как LRP5/6, а также в условиях достаточной концентрации лигандов. Кроме того, реализация пути требует активного участия различных белков, включая Dishevelled (Dsh) (цитоплазматический фосфопротеин, который действует непосредственно ниже рецепторов Frizzled); отсутствие деградации бета-катенина; взаимодействие с такими транскрипторами, как TCF/LEF; различного рода модификации бета-катенина (фосфорилирование, убиквитинирование и ацетилирование) способны влиять на его стабильность и активность, что необходимо

для данного пути. Цитоплазматический Dkk3 может связываться с бета-TrCP и способствовать деградации бета-катенина (это и есть данная внутриклеточная функция) [38].

Неканонический же путь Wnt, известный как Wnt-опосредованный сигнальный путь, не следует классической модели, которая включает в себя бета-катенин и его транскрипционные эффекты. Вместо этого он активирует ряд альтернативных сигнальных каскадов (путь планарной клеточной полярности и каскад Wnt/Ca²⁺) и молекул (ROR2, Ryk, кальций-зависимые протеинкиназы и др.), которые могут влиять на такие клеточные процессы, как клеточная миграция, организация ткани и развитие [15; 41].

Dkk3 как ген-супрессор опухолей. Dkk3 часто снижается в различных типах опухолей, линиях раковых клеток и иммортализованных клетках, как и ожидалось для опухолевого супрессора. Dkk3 действует как опухолевый супрессор через ингибирование сигнального пути Wnt/β-катенин (табл. 1) [1].

Таблица 1

Dkk3 как ген-супрессор опухолей

Table 1

Dkk3 as a tumor suppressor gene

Автор	Заболевание	Результат
Myung-Hoon Han, et al. (2022) [2]	Глиобластома	Показано, что высокая экспрессия Dkk3 отрицательно коррелировала с повышенным противоопухолевым иммунитетом, особенно CD8+ и CD4+ Т-клеток, у пациентов с глиобластомой
Naoki Katase, et al. (2022) [3]	Плоскоклеточный рак головы и шеи	Члены семейства Dkk3 кодируют секреторные белки с двумя различными доменами, богатыми цистеином (CRD1 и CRD2), которые функционируют как эндогенные ингибиторы сигнального пути Wnt/β-катенина и, следовательно, подавляют клеточную пролиферацию, миграцию, инвазию и рост опухоли <i>in vivo</i>
Pu Xia, Xiao-Yan Xu (2022) [4]	Онкообразования у голого землекопа (млекопитающее)	Результаты показывают, что гены-супрессоры, включая Dkk3, оказывают выраженное ингибирующее действие на раковые клетки, посредством ингибирования сигнальных путей AKT/mTOR и Wnt/β-катенина у голого землекопа
Mohammad Hasan Soheilifar, et al. (2022) [5]	Колоректальный рак	МикроРНК MiR-1290 значительно снизил экспрессию THBS1, Dkk3 и SCAI. Продемонстрировано, что miR-1290 усилил пролиферацию, миграцию и ангиогенез частично за счет подавления THBS1, Dkk3 и SCAI в колоректальном раке
Jana Mourtada, et al. (2023) [1]	—	Благодаря результатам многочисленных исследований подтверждается действие Dkk3 как гена-супрессора
Zainab Al Shareef, et al. (2023) [6]	Рак простаты	Результаты показали, что гены, модулируемые трансфекцией Dkk3, участвуют в регуляции подвижности клеток, секреторного фенотипа, связанного со старением (SASP), и сигнализации цитокинов в иммунной системе, а также в регуляции адаптивного иммунного ответа
Shuang Zhao, et al. (2020) [7]	Колоректальный рак	Демонстрируется, что сверхэкспрессия Dkk3 или обработка белком может ингибировать пролиферацию, миграцию и инвазию клеток колоректального рака. Они могут способствовать апоптозу и остановке фазы G ₂ с гипокспрессией Bcl-2, cdc25B, cdc25c, N-кадгерина, слага и твиста и гиперэкспрессией BAX и E-кадгерина
Zhiliang Xia, et al. (2024) [8]	Рак предстательной железы	Гены-супрессоры опухолей <i>WIF1</i> и <i>DKK3</i> являются ключевыми ингибиторами путей Wnt/β-катенина, PI3K/Akt и NF-κB, критически важными для подавления роста опухоли и метастазирования при раке предстательной железы
Yihua Pei, et al. (2021) [9]	Рак желудка	Dkk3 является супрессором опухолей, и его экспрессия значительно ниже при различных типах рака человека. Dkk3 может влиять на остановку клеточного цикла в фазе G1/G0, апоптоз клеток и высокий уровень цитоплазматического бета-катенина

Примечание. CD8+ – цитотоксические Т-лимфоциты; CD4+ – Т-хелперы; CRD1 – домен 1 богатый цистеином белка Dkk3; MiR – микроРНК; THBS1 – тромбоспондин 1; SCAI – супрессор инвазии раковых клеток; Bcl-2 – регулятор апоптоза Bcl-2; cdc25B – фосфатаза 2, индуктор М-фазы; cdc25c – фосфатаза 3, индуктор М-фазы; BAX – регулятор апоптоза BAX; WIF1 – фактор ингибирования Wnt 1.

Dkk3 как онкоген. Экспрессия Dkk3 повышена и проявляет проопухолевые функции в некоторых видах рака. Установлено, что она высока в плоскоклеточных карциномах пищевода, головы и шеи, а также в протоковой аденокарциноме поджелудочной железы, способствуя пролиферации и миграции раковых клеток (табл. 2).

Таблица 2

Dkk3 как онкоген

Table 2

Dkk3 as an oncogene

Автор	Заболевание	Результат
Anja Kafka, et al. (2021) [10]	Астроцитомы	Экспрессия генов Dkk3 контролируется метилированием ДНК, распространенным эпигенетическим инструментом подавления, который увеличивается во многих опухолях и линиях опухолевых клеток. Dkk3 показывает важность метилирования в регуляции активности сигнализации Wnt, а также указывает на проонкогенные эффекты GSK3 β на развитие и прогрессирование астроцитомы. Dkk3 играет ключевую роль в регуляции выживания клеток в злокачественной глиоме человека, способствует апоптозу и облегчает деградацию β -катенина
Priyanka Sehgal, et al. (2022) [11]	Колоректальный рак	Обнаружено, что Dkk3 подавляет сигнализацию Wnt в органоидах толстой кишки мышей с APC-нулевым геном и клетках рака толстой кишки человека, несмотря на наличие нижестоящих активирующих мутаций в пути Wnt
Fei Shen, et al. (2020) [12]	Рак щитовидной железы	При злокачественных новообразованиях (карцинома желудка, рак щитовидной железы) подавленная экспрессия Dkk3 тесно связана с агрессивными фенотипами и плохим прогнозом. Эктопическая экспрессия Dkk3 подавляет уровни экспрессии β -катенина, циклина D2 и E, а также регулирует клеточный цикл
Junko Kano, et al. (2023) [13]	Гепатоцеллюлярная карцинома	Показано, что Dkk3 функционирует как внеклеточная матриксная молекула, поддерживающая адгезию, подвижность и инвазию, и что ее взаимодействие с TGFBI подавляет функции секретируемого Dkk3 в клетках, экспрессирующих оба белка

Примечание. GSK3 β – гликогенсинтазы киназа-3 бета; Wnt – сигнальный путь Wnt; APC – аденоматозный полипоз толстой кишки; TGFBI – трансформирующий фактор роста, бета-индуцированный.

Пути регуляции клеточных процессов посредством Dkk3. Кроме общеизвестного сигнального пути Wnt, с которым непосредственно взаимодействует Dkk3, выступая в качестве антагониста, также рассматриваются и другие пути регуляции посредством Dkk3 (табл. 3).

Антагонисты Wnt сигнального пути. Wnts подвержены негативной и позитивной регуляции со стороны широкого спектра эффекторов, которые действуют либо внутриклеточно, модулируя компоненты механизма передачи сигнала, либо внеклеточно, модулируя взаимодействие лиганд-рецептор. В настоящее время известно пять семейств внеклеточных антагонистов Wnt, в том числе семейство секретируемых белков Dickkopf (Dkk) (табл. 4).

Взаимосвязь Dkk3 с субпопуляциями лимфоцитов. Dkk3 играет разнообразную роль в иммуномодуляции, которая распространяется на дифференцировку В-клеток, иммунную периферическую толерантность, дифференцировку дендритных клеток и воспаление. В исследовании Qingqu Guo, et al. (2021) [33], на модели совместного культивирования с раковыми клетками поджелудочной железы было показано, что сверхэкспрессия Dkk3 способствует активации и регуляции метаболизма и функции CD4⁺ Т-клеток.

Xiang Chen, et al. (2022) [34] отмечает влияние фактора транскрипции FoxO4 на Dkk3, что приводит к восстановлению нормального уровня продукции IFN- γ Th1 клетками посредством снижения экспрессии фактора связывания лимфоидного энхансера 1 (Lef1).

В исследовании, проведенном Timothy N, et al. (2023) [35], установлено, что полученный из опухоли белок стволовых клеток/базальных клеток ингибитор сигнального пути Dkk3 имеет решающее значение для ингибирования Treg CD8⁺T-клеток. В [35] показано, что Dkk3 способствует иммуноопосредованному прогрессированию пролиферативных опухолей и в значительной степени связан с плохой выживаемостью и иммуносупрессией при раке груди у человека.

Таблица 3

Пути регуляции клеточных процессов посредством Dkk3

Table 3

Pathways of regulation of cellular processes by Dkk3

Автор	Путь	Результат
Javier Conde, et al. (2021) [14]	NF- κ B	Обнаружено снижение экспрессии Dkk3 в человеческих хондроцитах при остеоартрите, стимулированных интерлейкином-1 α (IL-1 α), что приводило к увеличению продукции MMP-13
Long-Qing Zhang, et al. (2022) [15]	Кремен-1 и DVL-1	Результаты свидетельствуют о том, что Dkk3 облегчает нейропатическую боль посредством ингибирования поляризации микроглии и нейровоспаления, опосредованных сигнальным путем ASK-1/JNK/p-38, по крайней мере частично, посредством путей Кремена-1 и DVL-1
Kirti Gondkar, et al. (2021) [16]	Сигнальный путь сиртуина	Dkk3 потенциальный супрессор опухолей при раке желчного пузыря, который влияет на инвазию клеток, пролиферацию и способность к образованию колоний в клеточных линиях раке желчного пузыря. При сверхэкспрессии Dkk3 наблюдалось изменение сигнализации протеинкиназы A и сигнального пути сиртуина
Jana Mourtada, et al. (2023) [17]	DKK3/NF- κ B	Обнаружено, что уровни экспрессии Δ Np63 коррелируют с улучшенной противоопухолевой иммунной средой при плоскоклеточном раке ротоглотки, а Δ Np63 способствует фагоцитозу раковых клеток макрофагами через путь, зависимый от Dkk3/NF- κ B
Yuanyuan Zhou, et al. (2022) [18]	Wnt/ β -catenin	Как отрицательный регулятор сигнального пути Wnt, Dkk3 ингибирует пролиферацию или ускоряет апоптоза клеток. miR-129-5p может напрямую воздействовать на путь Wnt/ β -катенина, опосредованный Dkk3, а miR-129-5p/Dkk3 способствует остеогенезу и регенерации костей
Le Kang, et al. (2023) [19]	GSK-3 β / β -катенина	Снижение уровня ядерного респираторного фактора 1 (NRF1) облегчает вызванное ЛПС воспалительное повреждение в поврежденных ЛПС клетках WI-38 и MRC-5 посредством повышения уровня Dkk3 и инактивации пути GSK-3 β / β -катенина

Примечание. NF- κ B – транскрипционный фактор NF- κ B; MMP-13 – матриксная металлопептидаза 13; DVL-1 – сегментный белок полярности; ASK-1 – киназа 1, регулирующая сигнал апоптоза; JNK – N-концевые киназы c-Jun; Δ Np63 – транскрипционный фактор семейства p53; PI3k – фосфоинозитид-3-киназа; Akt – RAC-альфа-серин/треонин-протеинкиназа; GSK-3 β – гликогенсинтаза киназа-3 бета; ЛПС – липополисахарид; WI-38 – диплоидная клеточная линия фибробластов человека; MRC-5 – диплоидная линия культуры клеток, состоящая из фибробластов, полученных из легочной ткани абортированного белого плода мужского пола в возрасте 14 недель.

Таблица 4

Антагонисты Wnt сигнального пути

Table 4

Antagonists of the Wnt signalling pathway

Автор	Результат
Myung-Hoon Han, et al. (2023) [20]	По мере увеличения степени глиомы Dkk3 демонстрирует тенденцию к более сильной положительной корреляции с экспрессией других генов, связанных с путем Wnt/ β -катенина. Dkk3 не был связан с иммуносупрессией при глиоме низкой степени злокачественности (LGG), но влиял на подавление иммунных реакций при мультиформной глиобластоме (GBM)
Quan-Wen Liu, et al. (2022) [21]	Результаты продемонстрировали, что IGFBP-3, Dkk3 и Dkk1, секретируемые hAMSC, ослабляют фиброз печени у мышей посредством ингибирования активации HSC и подавления сигнального пути Wnt/ β -катенина
Maria Caffo, et al. (2023) [22]	Результаты показали, что Dkk3 действует как ингибитор сигнализации Wnt/ β -катенина во время церебральной ишемии. Кроме того, его ингибирование и активация пути Wnt/ β -катенина защищают от ишемического инсульта
Zainab Al Shareef, et al. (2022) [23]	Dkk3, по-видимому, обладает способностью усиливать или уменьшать прогрессирование рака, изменяя реакции опухолевых клеток на сигналы, опосредованные Wnts (β -катенин-зависимые и -независимые через JNK), TGF- β
Akio Takeuchi, et al. (2022) [24]	Dkk3-метилированные клетки желудочного эпителия, которые растут в слизистой оболочке желудка старых мышей, составляют меньшинство в физиологическом состоянии, но размножаются в культуре органоидов из-за обильных факторов, стимулирующих сигнализацию Wnt/ β -катенина. Усиленная экспрессия Tbx3 наблюдалась в тканях рака желудка человека. Этот путь Dkk3-Wnt-Tbx3 может быть вовлечен в канцерогенез желудка
Anja Kafka, et al. (2024) [25]	Результаты исследования связи изменений SFRP4 с ключевыми регуляторами Wnt GSK3 β и Dkk3 установили положительную корреляцию между метилированием SFRP4 и GSK3 β . Экспрессия SFRP4 коррелировала с неметилированным Dkk3, что указывает на то, что антагонист сигнализации Wnt связан с деметилированием отрицательного регулятора Dkk3
Yuling Li, et al. (2022) [26]	Результаты свидетельствуют о том, что низкомолекулярный ингибитор антиапоптотических белков Bcl-2 – апогоссиполон (ApoG2) может эффективно подавлять рост и инвазию клеток CC, по крайней мере частично, активируя Dkk3
Maria Caffo, et al. (2024) [27]	Модуляция Wnt пути через экспрессию Dkk3 может представлять собой новую индивидуальную терапевтическую стратегию в лечении глиобластомы
Jianling Song, et al. (2024) [28]	Повышение экспрессии Dkk3, вызванное модификацией N ⁶ -метиладенозина (m ⁶ A), активирует путь Wnt/ β -катенина, увеличивая экспрессию транскрипции MFF, что приводит к дисфункции митохондрий и окислительному стрессу, тем самым способствуя прогрессированию почечного фиброза
Harshita Shailesh, et al. (2020) [29]	Результаты показывают, что PRMT5 контролирует рост клеток рака молочной железы посредством эпигенетического подавления антагонистов пути Wnt/ β -catenin, Dkk1 и Dkk3, что приводит к повышению регуляции пролиферативной сигнализации Wnt/ β -catenin
Riley A. Cooney, et al. (2023) [30]	Показано, что Dkk3, секретируемый канонический регулятор Wnt и WNT4, неканонический лиганд Wnt, действуют вместе, способствуя переключению канонической на неканоническую сигнализацию Wnt во время формирования мультиресничных клеток, обеспечивающих мукоцилиарный клиренс дыхательных путей человека
Ze Zhang, et al. (2024) [31]	Результаты показали, что сверхэкспрессия Dkk3 мезенхимальными стволовыми клетками костного мозга при дифференцировке в предшественники адипоцитов привела к значительному снижению экспрессии маркерного гена, связанного с сигнальным путем Wnt/ β -катенина, повышению экспрессии генов, связанных с адипогенной дифференцировкой
Pengfei Zhu, et al. (2020) [32]	Показано, что кольцевая РНК hsa_circ_0004018 взаимодействовала с miR-626/Dkk3 и способствовала пролиферации и миграции клеток HCC посредством ингибирования сигнального пути Wnt/ β -катенина <i>in vitro</i>

Примечание. IGFBP-3 – белок 3, связывающий инсулиноподобный фактор роста; hAMSC – мезенхимальные стромальные клетки околоплодных вод человека; HSCs – звездчатые клетки печени; TGF- β – трансформирующий фактор роста бета; Tbx3 – фактор транскрипции T-box TBX3; SFRP4 – секретируемый белок frizzled-related 4; MFF – фактор деления митохондрий; hsa_circ_0004018 – кольцевая РНК.

Регуляция цитотоксичности лимфоцитов посредством Dkk3. В исследованиях, посвященных Dkk3 и его взаимосвязи с иммунной системой человека, кроме иммуномодулирующей функции, отдельно рассматривается регуляция цитотоксичности лимфоцитов посредством Dkk3. Он принимает непосредственное участие в установлении толерантности периферических CD8 Т-клеток. Наблюдением подтверждается, что экспрессия Dkk3 повышена в толерантных CD8 Т-клетках. Она способствует снижению общей реактивности CD8 Т-клеток *in vitro*. В исследовании, проведенном Da-Hua Liu, et al. (2023) [36], установлены низкие уровни Dkk3 у больных раком печени и выявлена отрицательная корреляция между Dkk3 и циркулирующими CD56+ NK-клетками. Впервые обнаружено, что он индуцирует дифференцировку и улучшает цитотоксичность CD56+ NK-клеток.

Таким образом, в каждом из выделенных направлений получены результаты, которые расширяют область знаний о Dkk3 и позволяют в дальнейшем раскрывать новые аспекты в изучении его роли в регуляции цитотоксичности лимфоцитов.

Заключение

В результате систематического обзора выявлено: Dkk3 представляет собой ген, кодирующий белок, который является членом семейства dickkopf. Данный белок обладает разнообразными биологическими ролями, участвуя в защите клеток, выступая в качестве гена-супрессора для подавления опухоли или наоборот является онкогеном, а также принимает участие в иммунном ответе и воспалении.

Dkk3 выступает как белок-ингибитор сигнального пути Wnt. Он связывается с рецепторами Wnt (Frizzled, LRP5/6), что может привести к снижению активации бета-катенина и других мишеней пути Wnt. Помимо основного сигнального пути Wnt, в котором участвует Dkk3, отмечена взаимосвязь и с другими путями. Путь NF- κ B вовлекается в снижение экспрессии Dkk3 за счет увеличения продукции в MMP-13. В другом исследовании было отмечено, что регуляция Dkk3 может повышаться за счет снижения экспрессии NRF1 и приводить к инактивации пути GSK-3 β / β -катенина [39].

Dkk3 может играть двойную роль, способствуя развитию рака или подавляя его в зависимости от конкретной ткани и/или клеточного контекста. Ингибирующее действие Dkk3 на сигнальный путь Wnt указывает на его потенциальную роль в подавлении опухолей из-за преобладающего проонкогенного воздействия чрезмерной активации сигнального пути Wnt [1].

Участие Dkk3 в регуляции цитотоксичности до сих пор остается направлением, которое активно изучается. Он выполняет функции как в раковых, так и в иммунных клетках, что позволяет предположить, что воздействие на один фактор может иметь множественные и, возможно, синергетические эффекты. Необходимы дальнейшие исследования, чтобы полностью охарактеризовать и понять сложное взаимодействие между Dkk3 и иммунной системой [1].

Библиографические ссылки / References

1. Mourtada J, et al. The Multifaceted Role of Human Dickkopf-3 (DKK-3) in Development, Immune Modulation and Cancer. *Cells*. 2024;13(1):1–14. DOI: 10.3390/cells13010075.
2. Han M, et al. High DKK3 expression related to immunosuppression was associated with poor prognosis in glioblastoma: machine learning approach. *Cancer Immunology, Immunotherapy*. 2022;71:3013–3027. DOI: 10.1007/s00262-022-03222-4.
3. Katase N, et al. Establishment of anti-DKK3 peptide for the cancer control in head and neck squamous cell carcinoma (HNSCC). *Cancer Cell International*. 2022;22(352):1–16. DOI: 10.1186/s12935-022-02783-9.
4. Xia Pu, Xu X. Use of tumor suppressor genes of naked mole rats for human cancer treatment. *American Journal of Translational Research*. 2023;15(8):5356–5363. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10492090/>.
5. Soheilifar MH, et al. miR-1290 contributes to oncogenesis and angiogenesis via targeting of THBS1, DKK3 and, SCAI. *BioImpacts*. 2022;12(4):349–358. DOI: 10.34172/bi.2021.23571.
6. Shareef ZA, et al. DKK3's protective role in prostate cancer is partly due to the modulation of immunerelated pathways. *Frontiers in Immunology*. 2023;14:1–12. DOI: 10.3389/fimmu.2023.978236.
7. Zhao S, et al. The Suppressing Effects of Dkk3 Expression on Aggressiveness and Tumorigenesis of Colorectal Cancer. *Frontiers in Oncology*. 2020;10:1–13. DOI: 10.3389/fonc.2020.600322.
8. Xia Z, et al. WIF1 and DKK3 in prostate cancer: from molecular pathways to therapeutic targets: a narrative review. *Translational Andrology and Urology*. 2024;13(11):2601–2616. DOI: 10.21037/tau-24-304.
9. Kafka A, et al. Methylation Patterns of DKK1, DKK3 and GSK3b Are Accompanied with Different Expression Levels in Human Astrocytoma. *Cancers*. 2021;13(2530):1–17. DOI: 10.3390/cancers13112530.
10. Pei Y, et al. MicroRNA miR-425 promotes tumor progression by inhibiting Dickkopf-related protein-3 in gastric cancer. *Bioengineered*. 2021;12(1):2045–2054. DOI: 10.1080/21655979.2021.1930743.
11. Sehgal P, et al. MYC hyperactivates WNT signaling in APC/CTNNB1-mutated colorectal cancer cells through miR-92a-dependent repression of DKK3. *Molecular cancer research*. 2022;19(12):1–25. DOI: 10.1158/1541-7786.MCR-21-0666.
12. Shen F, et al. MicroRNA-3690 promotes cell proliferation and cell cycle progression by altering DKK3 expression in human thyroid cancer. *Oncology Letters*. 2020;20(5):1–8. DOI: 10.3892/ol.2020.12086.
13. Kano J, et al. Roles of DKK3 in cellular adhesion, motility, and invasion through extracellular interaction with TGFBI. *The FEBS Journal*. 2022;289(20):6385–6399. DOI: 10.1111/febs.16529.

14. Conde J, et al. Dickkopf-3 (DKK3) Signaling in IL-1 α -Challenged Chondrocytes: Involvement of the NF- κ B Pathway. *J. Chondrocytes*. 2021;13(2):925–934. DOI: 10.1177/194760352093328.
15. Zhang L, et al. DKK3 ameliorates neuropathic pain via inhibiting ASK-1/JNK/p-38-mediated microglia polarization and neuroinflammation. *Journal of Neuroinflammation*. 2022;19(129):1–24. DOI: 10.1186/s12974-022-02495-x.
16. Gondkar K, et al. Integrated Proteomic and Phosphoproteomics Analysis of DKK3 Signaling Reveals Activated Kinase in the Most Aggressive Gallbladder Cancer. *Cells*. 2021;10(511):1–16. DOI: 10.3390/cells10030511.
17. Mourtada J, et al. A novel DNp63-dependent immune mechanism improves prognosis of HPV-related head and neck cancer. *Frontiers in Immunology*. 2023;14:1–18. DOI: 10.3389/fimmu.2023.1264093.
18. Zhou Y, et al. Identification of Key Genes and Pathways Associated with PIEZO1 in Bone-Related Disease Based on Bioinformatics. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(5220):1–15. DOI: 10.3390/ijms23095250.
19. Kang L, et al. NRF1 knockdown alleviates lipopolysaccharide-induced pulmonary inflammatory injury by upregulating DKK3 and inhibiting the GSK-3 β / β -catenin pathway. *Clinical and Experimental Immunology*. 2023;214(1):120–129. DOI: 10.1093/cei/uxad071.
20. Han M, et al. DKK3 expression is associated with immunosuppression and poor prognosis in glioblastoma, in contrast to lower-grade gliomas. *BMC Neurology*. 2023;23(183):1–14. DOI: 10.1186/s12883-023-03236-0.
21. Liu Q, et al. Human amniotic mesenchymal stem cells-derived IGFBP-3, DKK-3, and DKK-1 attenuate liver fibrosis through inhibiting hepatic stellate cell activation by blocking Wnt/ β -catenin signaling pathway in mice. *Stem Cell Research & Therapy*. 2022;13(224):1–18. DOI: 10.1186/s13287-022-02906-z.
22. Caffo M, et al. Molecular Investigation of DKK3 in Cerebral Ischemic/Reperfusion Injury. *Biomedicines*. 2023;11(815):1–9. DOI: 10.3390/biomedicines11030815.
23. Shareef A, et al. Dickkopf-3: An Update on a Potential Regulator of the Tumor Microenvironment. *Cancers*. 2022;14(5822):1–16. DOI: 10.3390/cancers14235822.
24. Takeuchi A, et al. Suppressed Cellular Senescence Mediated by T-box3 in Aged Gastric Epithelial Cells may Contribute to Aging-related Carcinogenesis. *Cancer research communications*. 2022;2(8):772–783. DOI: 10.1158/2767-9764.CRC-22-0084.
25. Kafka A, et al. SFRP4 protein expression is reduced in high grade astrocytomas which is not caused by the methylation of its promoter. *Frontiers in molecular neuroscience*. 2024;17:1–15. DOI: 10.3389/fnmol.2024.1398872/full.
26. Li Y, et al. Apogossypolone Inhibits Cell Proliferation and Epithelial- Mesenchymal Transition in Cervical Cancer via Activating DKK3. *Frontiers in oncology*. 2022;12:1–11. DOI: 10.3389/fonc.2022.948023/full.
27. Caffo M, et al. DKK3 Expression in Glioblastoma: Correlations with Biomolecular Markers. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024;25(4091):1–16. DOI: 10.3390/ijms25074091.
28. Song J, et al. DKK3 promotes renal fibrosis by increasing MFF-mediated mitochondrial dysfunction in Wnt/ β -catenin pathway-dependent manner. *Renal failure*. 2024;46(1):1–15. DOI: 10.1080/0886022X.2024.2343817.
29. Shailesh H, Kodappully S, Sif S. Protein arginine methyltransferase 5 (PRMT5) activates WNT/ β -catenin signalling in breast cancer cells via epigenetic silencing of DKK1 and DKK3. *Journal of Cellular and Molecular Medicine*. 2021;25:1583–1600. DOI: 10.1111/jcmm.16260.
30. Cooney RA, et al. A WNT4- and DKK3-driven canonical to noncanonical Wnt signaling switch controls multiciliogenesis. *Journal of Cell Science*. 2023;136:1–15. DOI: 10.1242/jcs.260807.
31. Zhang Z, et al. DKK3 promotes adipogenic differentiation of stem cells by inhibiting Wnt/ β -catenin signaling pathway related gene expression and mitochondrial autophagy. *Poultry science*. 2024;103(12):1–13. DOI: 10.1016/j.psj.2024.104257.
32. Zhu P, et al. Circular RNA Hsa_circ_0004018 Inhibits Wnt/ β -Catenin Signaling Pathway by Targeting microRNA-626/DKK3 in Hepatocellular Carcinoma. *OncoTargets and Therapy*. 2020;13:9351–9364. DOI: 10.2147/OTT.S254997.
33. Guo Q, et al. Dickkopf-related protein 3 alters aerobic glycolysis in pancreatic cancer BxPC-3 cells, promoting CD4 $^{+}$ T-cell activation and function. *European Journal of Medical Research*. 2021;26(93):1–10. DOI: 10.1186/s40001-021-00567-x.
34. Chen X, et al. The FoxO4/DKK3 axis represses IFN- γ expression by Th1 cells and limits antimicrobial immunity. *Journal of Clinical Investigation*. 2022;132(18):1–12. DOI: 10.1172/JCI147566.
35. Timothy N, et al. Dormant tumors circumvent tumorspecific adaptive immunity by establishing a Treg-dominated niche via DKK3. *JCI Insight*. 2023;8(22):1–20. DOI: 10.1172/jci.insight.174458.
36. Liu D, et al. Effect of secretory DKK3 on circulating CD56bright natural killer cells in patients with liver cancer. *The International Journal of Biological Markers*. 2023;38(2):99–104. DOI: 10.1177/03936155231169796.
37. PRISMA [Internet, cited 2024 December 23]. Available from: <https://www.prisma-statement.org/>.
38. Dellinger TH, et al. Expression of the Wnt antagonist Dickkopf-3 is associated with prognostic clinicopathologic characteristics and impairs proliferation and invasion in endometrial cancer. *Gynecologic oncology*. 2012;126(2):259–267. DOI: 10.1016/j.ygyno.2012.04.026.
39. Hayat R, Manzoor M, Hussain A. Wnt signaling pathway. A comprehensive review. *Cell biology international*. 2022;46(6):863–877. DOI: 10.1002/cbin.11797.
40. Meister M, et al. Dickkopf-3, a tissue-derived modulator of local T-cell responses. *Frontiers in Immunology*. 2015;6(78):1–13. DOI: 10.3389/fimmu.2015.00078.
41. Atlas of Genetics and Cytogenetics in Oncology and Haematology [Internet, cited 2024 December 13]. Available from: <https://atlasgeneticsoncology.org/gene/40327/dkk3>.

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 504.06; 574.4

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ГЕОСИСТЕМ И ЕЕ АПРОБАЦИЯ В ЗОНАХ ВЛИЯНИЯ ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ

А. А. ВОЛЧЕК¹⁾, А. В. БЕЗРУЧКО²⁾

¹⁾Брестский государственный технический университет,
ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь

²⁾Брестский областной комитет природных ресурсов и охраны окружающей среды,
пл. Свободы, 11, 224030, г. Брест, Беларусь

Разработана методика комплексной оценки экологического состояния природно-техногенных геосистем в зонах влияния полигонов твердых коммунальных отходов Брестской области. Данная методика апробирована на полигонах твердых коммунальных отходов (Барановичи, Брест, Береза, Кобрин, Лунинец, Пинск). Проведено ранжирование исследуемых полигонов по косвенным и прямым критериям, при помощи которых установлена минимальное и максимальное негативное воздействие обследованных полигонов на такие компоненты окружающей среды, как подземные воды и почвы. Проведенное ранжирование обследованных полигонов свидетельствует о том, что с течением времени каждый из них в разной степени влияет на компоненты окружающей среды (подземные воды, почву).

Образец цитирования:

Волчек АА, Безручко АВ. Методика комплексной оценки экологического состояния природно-техногенных геосистем и ее апробация в зонах влияния полигонов твердых коммунальных отходов Брестской области. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;2:88–97. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-88-97>

For citation:

Volchek AA, Biazruchka AB. The method of comprehensive assessment of the ecological state of natural and man-made geosystems and its approbation in the zones of influence of landfills of solid municipal waste in the Brest region. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;2:88–97. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-88-97>

Авторы:

Александр Александрович Волчек – доктор географических наук, профессор кафедры природообустройства.
Алена Витальевна Безручко – аспирант факультета инженерных систем и экологии; начальник отдела контроля за охраной и использованием атмосферного воздуха и водных ресурсов.

Authors:

Aleksandr A. Volchak, doctor of science (geography), professor at the department of environmental engineering.
volchak@tut.by
Alena V. Biazruchka, graduate student, faculty of engineering systems and ecology; head of the department of control over the protection and use of atmospheric air and water resources.
alena-bezruchko@yandex.by

По данным 2023 г., минимально негативное влияние по косвенным критериям, макро- и микрокомпонентному составу и органическим соединениям в подземных водах оказывает полигон г. Береза. Наименьшее загрязнение почв установлено на полигонах ТКО Пинск, Барановичи. Самая неблагоприятная обстановка с загрязнением почв обстоит вблизи полигона Лунинец.

Ключевые слова: полигон твердых коммунальных отходов; подземные воды; почвы; методика; комплексная оценка; макрокомпоненты; микроэлементы.

Благодарность. Исследования выполнены в рамках работы БРФФИ–Брест-2022 (проект X22Б-010, № ГР 20220931). Авторы выражают благодарность сотрудникам ГНУ «Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси» и директору Николаю Васильевичу Михальчуку за оказанную помощь в проведении исследований.

THE METHOD OF COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF NATURAL AND MAN-MADE GEOSYSTEMS AND ITS APPROBATION IN THE ZONES OF INFLUENCE OF LANDFILLS OF SOLID MUNICIPAL WASTE IN THE BREST REGION

A. A. VOLCHEK^a, A. B. BIAZRUCHKA^b

^a*Brest State Technical University,
267 Maskoŭskaja Street, Brest 224017, Belarus*

^b*Brest Regional Committee of Natural Resources and Environmental Protection,
11 Svobody Square, Brest 224030, Belarus*

Corresponding author: A. B. Biazruchka (alena-bezruchko@yandex.by)

A methodology has been developed for the «Comprehensive assessment of the ecological state of natural and man-made geosystems in the zones of influence of landfills of solid municipal waste in the Brest region». This technique has been tested at landfills of municipal solid waste (hereinafter referred to as MSW) in Baranovichi, Brest, Bereza, Kobrin, Luninets, Pinsk. The MSW landfills under study were ranked according to indirect and direct criteria, with the help of which the minimum and maximum negative impact of the examined MSW landfills on environmental components such as groundwater and soils was established. The ranking of the surveyed polygons shows that over time, each polygon affects environmental components (groundwater, soil, vegetation) to one degree or another. According to data for 2023, the solid waste landfill in Birch has minimal negative impact on indirect criteria, macro- and micro-component composition and organic compounds in groundwater. The least soil pollution was found at landfills in Pinsk and Baranovichi. The most unfavorable situation with soil pollution has developed near the Luninetskaya landfill.

Keywords: landfill of solid household waste; groundwater; soils; methodology; comprehensive assessment; macro components; trace elements.

Acknowledgements. The research was carried out within the framework of the BRFFI–Brest-2022 (project X22B-010, no. GR 20220931). The authors are grateful to the National Research University «Polesky Agrarian and Ecological Institute of the National Academy of Sciences of Belarus» and personally to Director Nikolai Vasilyevich Mihalchuk for their assistance in conducting research.

Введение

В современном мире при стремительном развитии цивилизации назрела проблема утилизации образующихся отходов. В настоящее время основным и затратным путем утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) является их захоронение на специально отведенных и оборудованных полигонах.

Объект захоронения отходов – полигон, иное капитальное строение (здание, сооружение), предназначенные для захоронения отходов¹.

Отходы, захораниваемые на полигонах, разнородны по составу, классам опасности, физико-химическим и биохимическим свойствам. Под воздействием атмосферы, воды, грунтов, взаимодействуя друг с другом, они претерпевают сложные изменения. Основные процессы, протекающие в теле полигона, – это физические, химические и биохимические, которые накладываются друг на друга, усиливаются, подавляются, видоизменяются [2].

¹Об обращении с отходами: Закон Республики Беларусь, 20 июля 2007 г., № 271-З // Нац. правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 05.01.2024, 2/3052.

Так, согласно [3], способ захоронения твердых коммунальных отходов на полигонах ТКО является наиболее распространенным, а в современных условиях Беларуси с учетом экономических и экологических реалий – наиболее оптимальным. В Республике Беларусь в 2018 г. на таких полигонах было размещено около 3,1 млн т, а также 0,8 млн т отходов производства, не относящихся к коммунальным. При этом 94 % ТКО было захоронено на 159 полигонах.

Для сравнения, в России практически весь объем образующихся ТКО (96 %) захоранивается на полигонах, санкционированных и нелегальных свалках².

В настоящее время на территории Брестской области имеется 27 полигонов ТКО, на которых размещаются отходы потребления и некоторые виды отходов производств. Все полигоны находятся на балансе службы жилищно-коммунального хозяйства и относятся к сооружениям средней мощности [5]. На территории области полигонов большой мощности³ нет. Все полигоны зарегистрированы как объекты захоронения в РУП «Бел НИЦ «Экология» [6].

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что на сегодняшний день общепринятая и утвержденная методика оценки геоэкологических рисков от полигонов ТКО отсутствует. Сложностью разработки методов количественной оценки является невозможность учета всего комплекса негативного воздействия полигонов ТКО; оценки, как правило, ограничиваются только выяснением их влияния на грунтовые воды и почвы.

Для оценки геоэкологических рисков от исследуемых полигонов ТКО И. В. Черновой (2019) использована методика РУП «БелНИЦ «Экология», которая учитывает совокупность прямых (суммарные индексы загрязнения грунтовых вод и почв) и косвенных (объем накопившихся отходов и долю экологически опасных отходов, размещаемых на полигонах ТКО) показателей. Данная методика позволяет осуществлять учет оценки рисков от загрязнения нескольких компонентов (грунтовых вод и почв). Она ориентирована на санитарно-гигиенические нормативы качества окружающей среды, утвержденные постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 25.01.2001 № 37. Данные нормы едины на всей территории республики. Однако методика не учитывает специфику фоновых показателей территорий, на которых расположены объекты захоронения.

Цель исследования: усовершенствовать методику РУП «БелНИЦ «Экология» для оценки геоэкологических рисков от полигонов ТКО с использованием прямых и косвенных критериев оценки их воздействия на окружающую среду, с учетом фоновых показателей для каждого объекта отдельно. Расширить спектр используемых данных показателями уровней загрязнения почв в импактных зонах полигонов ТКО.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследований выступали полигоны ТКО городов Барановичи, Брест, Береза, Кобрин, Лунинец, Пинск, подземные воды, почвы в пределах санитарно-защитных зон полигонов.

Методы исследований: ландшафтно-геохимический (ландшафтно-геохимическая и гидрохимическая съемка), химико-аналитический (титриметрический, гравиметрический, бихроматный, флуориметрический, потенциометрический, фотометрический методы), метод атомно-абсорбционной спектроскопии, статистический и сравнительный анализ.

Химико-аналитические исследования проб проводились по стандартным методикам измерений, допущенных к применению в деятельности лабораторий экологического контроля предприятий и организаций Республики Беларусь, в Полесском аграрно-экологическом институте НАН Беларуси, который располагает всем необходимым оборудованием для качественного выполнения исследований в условиях, аккредитованных на соответствие требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 (ISO/IEC 17025:2017, IDT), лабораторий (регистрационный номер аттестата аккредитации: ВУ/112 1.1832 от 04.11.2022 г.; срок действия аттестата аккредитации: 04.11.2022–04.11.2027 гг.).

Состояние подземных вод оценивали путем сравнения полученных данных с фоновыми показателями для подземных безнапорных вод.

Гидрохимическая оценка подземных вод и почв в зонах влияния полигонов ТКО осуществлялась по макрокомпонентному составу (концентрация сульфат-, хлорид-, аммоний-, фосфат-ионов, а также железа и ХПК) и микроэлементам (концентрация свинца, цинка, марганца, никеля).

²ТКП 17.11-02-2009 (02120/02030). Охрана окружающей среды и природопользование. Отходы. Обращение с коммунальными отходами. Объекты захоронения твердых коммунальных отходов. Правила проектирования и эксплуатации = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Адыходы. Абыходжанне з камунальнымі адыходамі. Аб'екты захавання цвёрдых камунальных адыходаў. Правілы праектавання і эксплуатавання. Введ. 25.04.2009 г. Минск : Минприроды, 2014. 29 с.

³ТКП 17.11-02-2024 (33040/33140). Охрана окружающей среды и природопользование. Отходы. Эксплуатация объектов захоронения коммунальных отходов = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Адыходы. Эксплуатацыя аб'ектаў захавання камунальных адыходаў. Правілы праектавання і эксплуатавання. Введ. 01.05.2024 г. Минск : Минприроды, 2024. 21 с.

Исследования проб подземных вод выполнялись по следующим методикам: массовая концентрация нефти и нефтепродуктов (ПНД Ф 14:1:2:4.128-9), массовая концентрация железа общего (СТБ 17.13.05-45-2016), массовая концентрация нитритов (ГОСТ 33045-2014 п. 6, метод Б), массовая концентрация нитратов (ГОСТ 33045-2014 п. 9, метод Д), массовая концентрация аммиака и ионов аммония (ГОСТ 33045-2014 п. 5, метод А), массовая концентрация хлоридов (СТБ 17.13.05-42-2015), концентрация ортофосфата и тяжелых металлов (далее – ТМ) (ГОСТ 18309–2014, п. 6).

Определение содержания хлоридов в водах осуществлялось титриметрическим методом; нефти и нефтепродуктов – флуориметрическим методом; ХПК – бихроматным методом; азота нитритного, нитратного, аммонийного, железа общего и фосфора фосфатного – фотометрическим методом на спектрофотометре СФ-56А (заводской номер ХЕ0003). Определение содержания в водах ТМ (свинца, кадмия, цинка, меди, никеля, хрома, железа, кобальта и марганца) выполняли методом атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре с пламенным атомизатором SOLAAR M6 MkII, производитель ThermoElectron Corporation (заводской номер 135121).

Образцы для исследования (почв и подземных вод) отобраны с одинаковых трансект вблизи каждого объекта захоронения ТКО. Пробы подземных вод отбирались из наблюдательных скважин после 5-минутной прокачки. В случае мало дебетных скважин производилась полная откачка из них воды, с дальнейшим ожиданием наполнения ее до уровня, позволяющего сделать отбор образца.

Почвы вблизи полигонов ТКО дерново-подзолистые песчаные с типовым для Белорусского Полесья профилем. Исследования проб почвенного покрова в зонах влияния полигонов ТКО выполнялись по следующим показателям: pH_{KCl} (ГОСТ 26583-85), валового содержания ТМ (СТБ ИСО 110472006).

Пробы почвы отбирались с 1–10-сантиметрового слоя. Отборы проб проводились методом конверта в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017 «Почвы. Общие требования к отбору проб», ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Методы отбора проб химического, бактериологического, гельминтологического анализа», а также ТКП 17.03-02-2020 (33140) «Правила и порядок определения загрязнения земель (включая почвы) химическими веществами». Объединенная проба весом не менее 1 кг формировалась после смешивания 5 образцов, сыпалась в полиэтиленовую тару, маркировалась и регистрировалась. Исследования проводились на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связной плазмой iCAP 7200 в соответствии с ГОСТ ISO 22036-2014 «Качество почвы. Определение микроэлементов в экстрактах почвы с использованием атомно-эмиссионной спектроскопии индуктивно связанной плазмы».

Все пробы с указанных объектов отбирались и анализировались в трехкратной повторности. В работе приведено их среднее значение.

Разработанная методика апробирована на данных, полученных при анализе состава образцов почв и подземных вод за 2022–2023 гг., в рамках выполнения работы БРФФИ–Брест-2022 (проект Х22Б-010, № ГР 20220931), полученных в окрестностях полигона ТКО г. Бреста.

Результаты исследования и их обсуждение

Косвенные (побочные) критерии представляют собой совокупность эксплуатационных параметров полигонов (длительность эксплуатации, занятая отходами площадь, мощность, доля экологоопасных отходов) и оснащенности средозащитной инфраструктурой (наличие и состояние наблюдательных скважин, ограждения и обваловки, водоотводных канав и обводных каналов, системы перехвата легколетучих отходов ТКО с поверхности тела полигона, контрольного колодца уровня фильтрата, противифильтрационного экрана и системы сбора фильтрата).

Расчет косвенных (побочных) показателей осуществлялся по балльной системе по предложенной формуле:

$$N_{\text{косв}} = \sum N_{\text{тех}} + \sum N_{\text{инфр}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{косв}}$ – сумма баллов, определенная на основе учета косвенных показателей состояния полигонов ТКО; $\sum N_{\text{тех}}$ – совокупность эксплуатационных показателей полигонов (длительность эксплуатации, занятая отходами площадь, мощность, доля экологоопасных отходов); $\sum N_{\text{инфр}}$ – совокупность показателей оснащенности полигонов ТКО средозащитной инфраструктурой (наличие наблюдательных скважин, ограждения и обваловки, водоотводных канав и обводных каналов, контрольного колодца уровня фильтрата, противифильтрационного экрана и системы сбора фильтрата).

Эксплуатационные показатели полигонов ТКО Брестской обл. Нормативные документы 1980-х гг. допускали строительство полигонов со сроком эксплуатации до 10 лет [3]. Согласно действующему в Беларуси документу [4], средний расчетный срок эксплуатации полигона принимается в настоящее время за 15–20 лет.

Эксплуатационные показатели исследуемых полигонов ТКО (длительность эксплуатации, занятая отходами площадь, мощность, доля экологоопасных отходов) оценивалась по балльной системе от 3 до 0.

В этой связи по длительности эксплуатации полигоны ТКО можно подразделить на 4 группы: со сроком эксплуатации более 60 лет (нет таких полигонов ТКО, 3 балла), 40–60 лет (полигон ТКО гг. Кобрин, Пинск, 2 балла), 20–40 лет (полигоны ТКО гг. Лунинец, Брест, Барановичи, 1 балл), менее 20 лет (полигон ТКО г. Береза, 0 баллов). Среди обследованных самый «старый» полигон ТКО г. Кобрин функционирует около 54 лет, а самый «молодой» – около 5-и лет г. Береза (д. Речица).

По площади, занятой отходами, полигоны ТКО Брестской обл. можно также ранжировать на 4 группы: очень крупные (более 15 га (нет таких полигонов ТКО, 3 балла), крупные с занятой под отходами площадью от 10 до 15 га (полигоны ТКО гг. Бреста, Барановичи, 2 балла), средние – от 5 до 10 га (полигоны ТКО, гг. Пинск, Кобрин, Лунинец, 1 балл) и мелкие – менее 5 га (полигон ТКО г. Береза, 0 баллов).

По мощности (количество отходов, т/год) полигоны ТКО Брестской обл. также дифференцируются на 4 группы: полигоны, на которые поступает более 90 тыс. т отходов в год (полигон ТКО г. Бреста, 3 балла), от 60 до 90 тыс. т (таких полигонов нет, 2 балла), от 30 до 60 тыс. т (полигоны ТКО гг. Пинск, Барановичи, 1 балл) и менее 30 тыс. т (полигоны ТКО гг. Кобрин, Береза, Лунинец, 0 баллов). Из проанализированных данных следует, что на большинство обследованных полигонов области попадает менее 30 тыс. т отходов в год; при этом наибольшее количество отходов поступает на полигон ТКО г. Бреста (91,7 тыс. т/год).

По удельному весу захораниваемых экологоопасных отходов на территории области можно выделить также 4 группы: полигоны, на которых захоранивается более 7,5 % экологоопасных отходов (полигоны ТКО гг. Брест, Лунинец, 3 балла), от 5 до 7,5 % (полигон ТКО г. Барановичи – 2 балла), от 2,5 до 5 % (полигоны ТКО гг. Пинск, Береза, 1 балл) и менее 2,5 % (полигон ТКО г. Кобрин, 0 баллов). Количество (доля) образующихся экологоопасных отходов на территориях административных районов зависит от характера функционирующих производств (аграрного или промышленного).

На обследованных полигонах области захоранивается менее 5 % экологоопасных отходов, что отражает преимущественно аграрную специализацию соответствующих административных районов. Полигоны ТКО с большей долей экологоопасных отходов приурочены к районам с крупными промышленными производствами.

Оснащенность полигонов ТКО Брестской обл. средозащитной инфраструктурой. По оснащенности полигонов ТКО Брестской обл. средозащитной инфраструктурой балльную оценку (0–3 балла) осуществляли по следующим критериям: наличие доступных для отбора грунтовых вод скважин, ограждения по периметру, водоотводных канав и обводных каналов, противофильтрационного экрана (далее – ПФЭ), контрольного колодца уровня фильтрата и системы сбора фильтрата.

По наличию доступных для отбора скважин обследованные полигоны подразделяются на четыре группы: полигоны, на которых скважины отсутствуют (таких полигонов нет, 3 балла); полигоны, на которых обустроено от 1 до 5 скважин (полигоны ТКО гг. Кобрин, Пинск, Береза, Лунинец, 2 балла); полигоны, на которых обустроено от 6 до 11 скважин (полигон ТКО г. Барановичи, 1 балл) и полигоны, на которых обустроено более 11 скважин (полигон ТКО г. Брест, 0 баллов).

По наличию ограждения по периметру обследованные полигоны подразделяются на четыре группы: полигоны, на которых ограждение отсутствует (таких полигонов нет, 3 балла); полигоны, на которых ограждение обустроено частично (таких полигонов нет, 2 балла); полигоны, на которых ограждение обустроено по всему периметру с изъянами (полигоны ТКО гг. Брест, Кобрин, Лунинец, Береза, 1 балл) и полигоны, на которых ограждение обустроено по всему периметру без изъянов (полигоны ТКО гг. Барановичи, Пинск, 0 баллов).

По наличию водоотводных канав и обводных каналов полигоны ТКО области подразделяются на четыре группы: полигоны, на которых канавы и каналы отсутствуют (полигоны ТКО гг. Кобрин, Лунинец, 3 балла); полигоны, на которых канавы и каналы обустроены частично (полигоны ТКО гг. Барановичи, Брест, Пинск, Береза, 2 балла); полигоны, на которых канавы и каналы обустроены по всему периметру с изъянами (таких полигонов нет, 1 балл) и полигоны, на которых ограждение обустроено по всему периметру без изъянов (таких полигонов нет, 0 баллов).

По наличию контрольного колодца уровня фильтрата полигоны ТКО области также подразделяются на четыре группы: полигоны, на которых контрольный колодец уровня фильтрата отсутствует (полигоны ТКО гг. Кобрин, Пинск, 3 балла); полигоны, на которых контрольный колодец уровня фильтрата обустроен, но захламлен отходами и не используется для контроля (полигон ТКО г. Лунинец, 2 балла); полигоны, на которых контрольный колодец уровня фильтрата обустроен, но не используется для контроля (таких полигонов нет, 1 балл) и полигоны, на которых контрольный колодец уровня фильтрата обустроен, содержится в порядке и используется для контроля (полигоны ТКО гг. Брест, Береза, Барановичи, 0 баллов).

По наличию ПФЭ полигоны ТКО области подразделяются на четыре группы: полигоны, на которых ПФЭ отсутствует (полигон ТКО г. Кобрин, 3 балла); полигоны, на которых обустроен глиняный ПФЭ, или в основании полигона представлены глинистые грунты

природного генезиса (таких полигонов нет, 2 балла); полигоны, на которых обустроен ПФЭ с использованием искусственного материала (таких полигонов нет, 1 балл) и полигоны, на которых ПФЭ обустроен с использованием нескольких эффективных изолирующих материалов с размещением на предварительно созданный глиняный замок или глинистые пласты природного генезиса (полигоны ТКО гг. Барановичи, Береза, Пинск, Брест, Лунинец, 0 баллов).

По наличию системы сбора фильтрата полигоны ТКО области подразделяются на четыре группы: полигоны, на которых система сбора фильтрата отсутствует (полигон ТКО г. Кобрин, 3 балла); полигоны, на которых обустроена система сбора фильтрата без откачки на эксплуатируемые карты и без его вывоза на очистные сооружения (таких полигонов нет, 2 балла); полигоны, на которых обустроена система сбора фильтрата с его подъемом (откачкой) на эксплуатируемые карты (полигоны ТКО гг. Барановичи, Брест, Береза, Лунинец, Пинск, 1 балл) и полигоны, на которых обустроена система сбора фильтрата с вывозом его на очистные сооружения (таких полигонов нет, 0 баллов).

Нами предложена шкала ранжирования полигонов ТКО Брестской обл. по косвенным показателям, включающая четыре оценочные категории экологической опасности (табл. 1): экологическую норму с суммой баллов по десяти косвенным критериям менее 5; экологический риск с количеством баллов от 6 до 10, экологический кризис – от 11 до 15 и экологическое бедствие – свыше 16 баллов.

Таблица 1

Шкала ранжирования полигонов ТКО по косвенным показателям

Table 1

Scale of ranking of MSW polygons by indirect indicators

Количество баллов	Категория экологической опасности	Полигон и сумма баллов
Менее 5	Экологическая норма	–
6–10	Экологический риск	Береза (7), Барановичи (10)
11–15	Экологический кризис	Пинск (13), Брест (13), Лунинец (14)
Более 16	Экологическое бедствие	Кобрин (18)

Такая градация обследованных полигонов ТКО Брестской обл. в соответствии с разработанной нами шкалой показала, что по косвенным критериям ни один полигон ТКО не попал в зону экологической нормы. К категории «экологический риск» отнесены два полигона: полигон ТКО г. Береза с суммой баллов 7 и полигон ТКО г. Барановичи с суммой баллов 10. Категорией «экологического кризиса» характеризуются полигоны ТКО гг. Бреста и Пинска с суммой баллов, равной 13, а также полигон ТКО г. Лунина, сумма баллов которого составляет 14. Самая высокая категория экологической опасности по косвенным критериям характерна для полигона ТКО г. Кобрин с 18 баллами.

Таким образом, ранжирование обследованных полигонов ТКО Брестской обл. по косвенным критериям в порядке увеличения нагрузки на окружающую среду выглядит следующим образом:

$$\frac{\text{Береза}}{7} \ll \frac{\text{Барановичи}}{10} \ll \frac{\text{Брест, Пинск, Лунинец}}{13} < \frac{\text{Кобрин}}{18}$$

С помощью прямых критериев осуществляют количественную оценку воздействия полигонов на компоненты природной среды, которая в данной работе включает суммарные индексы загрязнения подземных вод и почв относительно фоновых показателей.

Для оценки воздействия полигонов ТКО на подземные воды и почвы использовали геоэкологический показатель – индекс загрязнения (IZ), представляющий собой отношение концентрации загрязняющих веществ к их фоновым показателям в местах отбора.

Комплекс и количество загрязняющих веществ оценивались с использованием суммарного индекса загрязнения (SIZ), представляющего сумму отношений концентрации загрязняющих веществ к их фоновым показателям:

$$SIZ = C_1/\text{фон}_1 + C_2/\text{фон}_2 + \dots + C_n/\text{фон}_n, \quad (1)$$

где C – средняя концентрация загрязнителя (мг/дм³ для вод, мг/кг для почв); фон_n – значение фонового показателя для данного вещества (мг/дм³ для вод, мг/кг для почв).

Расчет суммарного индекса загрязнения подземных вод ($SIZ_{ГВ}$) осуществлялся по макрокомпонентам ($SIZ_{МК}$), микроэлементам ($SIZ_{МЭ}$) и органическим веществам ($SIZ_{ОРС}$) в соответствии с формулой:

$$SIZ_{ГВ} = SIZ_{МК} + SIZ_{ОРС} + SIZ_{МЭ}. \tag{2}$$

Среди макрокомпонентов учитывались концентрации сульфат-, хлорид-, аммоний-, фосфат-ионов, а также железа и химическое потребление кислорода (далее – ХПК); среди органических соединений – анионные поверхностно-активные вещества (далее – АПАВ) и нефтепродукты (далее – НП); среди микроэлементов – концентрации свинца, цинка, марганца, никеля (табл. 2). Оценка состояния подземных вод осуществлялась отдельно по каждой из трех групп показателей. Суммарные индексы их загрязнения вод ($SIZ_{ГВ}$) отражены в табл. 2.

Наиболее негативное влияние на подземные воды на основании анализа макрокомпонентного состава установлено для полигона ТКО г. Бреста, для которого суммарный индекс загрязнения составил 889,5. Среди макрокомпонентов наибольшие превышения значений фоновых показателей отмечены для аммоний-ионов. Ряд приоритетности загрязнения грунтовых вод в зонах воздействия полигонов ТКО макрокомпонентами имеет следующий вид:

$$\frac{\text{Береза}}{53,3} < \frac{\text{Барановичи}}{56,0} < \frac{\text{Лунинец}}{85,2} < \frac{\text{Пинск}}{110,7} < \frac{\text{Кобрин}}{125,1} < \frac{\text{Брест}}{889,5}$$

Таблица 2

Суммарные индексы загрязнения грунтовых вод в зонах воздействия полигонов ТКО Брестской обл.

Table 2

Total indices of groundwater pollution in the impact zones of landfills of the Brest region

Название исследуемого объекта захоронения/показатель, мг/дм ³		$SIZ_{МК}$	$SIZ_{ОРС}$	$SIZ_{МЭ}$	$SIZ_{ГВ}$	Среднее значение
Лунинец	C ¹	555,9	0,384	0,809	557,106	555,9
	C/фон ²	85,2	5,0	18,8	111,0	85,2
Барановичи	C	569,608	0,262	0,657	570,527	569,608
	C/фон	56,0	7,8	25,4	112,7	56,0
Пинск	C	738,9	0,258	0,652	739,828	738,9
	C/фон	110,7	5,7	27,9	144,4	110,7
Кобрин	C	396,4	3,596	0,576	400,611	396,4
	C/фон	125,1	24,1	3,2	155,6	125,1
Береза	C	231,4	0,109	2,423	233,97	231,4
	C/фон	53,3	1,2	146,1	212,8	53,3
Брест	C	1418,5	1,038	0,731	1420,3	1418,5
	C/фон	889,5	37,8	7,8	975,7	889,5

¹ – Средняя концентрация загрязнителя в водах, мг/дм³;

² – превышение местного гидрохимического фонового показателя, мг/дм³.

Анализ содержания в подземных водах органических соединений свидетельствует о напряженной ситуации в зоне воздействия полигона ТКО г. Бреста – превышение фонового показателя составляет 37,8 раз. Наиболее благоприятная ситуация с незначительными суммарными индексами загрязнения установлена для полигона ТКО г. Береза. Ряд приоритетности загрязнения грунтовых вод в зонах воздействия полигонов ТКО органическими соединениями имеет следующий вид:

$$\frac{\text{Береза}}{1,2} < \frac{\text{Лунинец}}{5,0} < \frac{\text{Пинск}}{5,7} < \frac{\text{Барановичи}}{7,8} < \frac{\text{Кобрин}}{24,1} < \frac{\text{Брест}}{37,8}$$

Таким образом, установлено, что максимальное загрязнение подземных вод макрокомпонентами и органическими соединениями характерно для полигона ТКО г. Бреста, наименьшее – для импактной зоны полигона ТКО г. Березы.

По микроэлементному составу наиболее сильным отрицательным воздействием на окружающую среду характеризуется полигон ТКО г. Березы ($SIZ_{мэ} = 146,1$), наименее негативным – полигон ТКО г. Кобрин ($SIZ_{мэ} = 3,2$). Ряд загрязнения грунтовых вод в зонах воздействия полигонов ТКО микроэлементами имеет следующий вид:

$$\frac{\text{Кобрин}}{3,2} < \frac{\text{Брест}}{7,8} < \frac{\text{Лунинец}}{18,8} < \frac{\text{Барановичи}}{25,4} < \frac{\text{Пинск}}{27,9} < \frac{\text{Береза}}{146,1}$$

Воздействие полигона ТКО на почвы, как показали исследования, зависит от срока его эксплуатации, ландшафтно-геологической приуроченности, соблюдения гигиенических и технологических условий эксплуатации.

В сравнении с кларками для почв мира, по А. П. Виноградову [7], а также региональными кларками для дерново-подзолистых почв Беларуси [8–10], почвы-аналоги юго-запада Беларуси обеднены большинством микроэлементов, в особенности активно мигрирующими в условиях кислой среды. На основании этого расчет суммарного индекса загрязнения почв ($SIZ_{п}$) осуществлялся по микроэлементам ($SIZ_{мэ}$). Для оценки воздействия полигонов ТКО на почвы использован геоэкологический показатель – индекс загрязнения (IZ), представляющий собой отношение концентрации загрязняющих веществ к их фоновым показателям.

Фоновые показатели для почв зон воздействия принимались отдельно для группы исследуемых полигонов ТКО гг. Бреста, Березы, Пинска, Лунинца, Кобрин и отдельно для полигона ТКО г. Барановичи, что отражено в табл. 3.

Таблица 3

Суммарные индексы загрязнения почв в зонах воздействия полигонов ТКО Брестской обл.

Table 3

Total indices of soil pollution in the zones of impact of landfills of the Brest region

Полигон / показатель		<i>Pb</i>	<i>Cd</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Co</i>	<i>Cr</i>	$SIZ_{п}$	Среднее значение
Пинск	C^1	3,49	0,04	1,64	9,69	79,15	1,04	0,52	3,44		
	$C/\text{фон}^2$	0,65	0,44	1,27	1,30	0,72	1,58	1,16	1,835	8,9	1,1
Барановичи	C	8,11	0,04	3,43	16,44	186,2	4,81	2,08	11,45		
	$C/\text{фон}$	0,87	1,33	1,51 ⁵	1,02	1,01	1,08	1,11	0,97	8,9	1,1
Брест	C	9,12	0,03	1,10	8,58	40,63	1,40	0,49	3,76		
	$C/\text{фон}$	1,69	0,34	0,85	1,15	0,37	2,125	1,09	2,00	9,6	1,2
Кобрин	C	5,84	0,11	1,90	10,41	24,84	1,47	0,53	3,59		
	$C/\text{фон}$	1,08	1,25	1,47	1,40	0,23	2,235	1,17	1,91	10,7	1,3
Береза	C	2,31	0,00	1,06	9,57	21,61	2,12	0,88	8,71		
	$C/\text{фон}$	0,43	0,00	0,82	1,29	0,20	3,21	1,96	4,635	12,5	1,6
Лунинец	C	7,47	0,04	1,96	19,37	81,86	2,45	0,83	5,00		
	$C/\text{фон}$	1,39	0,44	1,52	2,61	0,75	3,715	1,83	2,66	14,9	1,9
СФ-1 ³	–	5,39	0,09	1,29	7,43	109,6	0,66	0,45	1,88	–	–
СФ-2 ⁴	–	9,29	0,03	2,28	7,43	184,7	4,47	1,87	11,85	–	–

¹ – Средняя концентрация загрязнителя в почве, мг/кг; ² – превышение по отношению к фоновому показателю, раз; ³ – фоновый показатель для полигонов ТКО гг. Брест, Береза, Пинск, Лунинец, Кобрин; ⁴ – фоновый показатель для полигонов ТКО г. Барановичи; ⁵ – максимальные значения превышения фоновых показателей для каждого полигона.

Анализ полученных данных свидетельствует, что содержание в почвах микроэлементов по отношению к фоновому показателю наибольшее в зоне воздействия полигона ТКО г. Лунина (SIZп = 14,9), наименьшее – полигона ТКО гг. Пинска и Барановичи (SIZп = 8,9).

Ряд приоритетности загрязнения почв в зонах воздействия полигонов ТКО микроэлементами имеет следующий вид:

<u>Пинск, Барановичи</u>	<	<u>Брест</u>	<	<u>Кобрин</u>	<	<u>Береза</u>	<	<u>Лунина</u>
8,9		9,6		10,7		12,5		14,9

Геохимическое состояние почвенного покрова в зонах влияния исследуемых полигонов ТКО в целом не вызывает опасений. Вместе с тем сравнительный анализ содержания микроэлементов (табл. 3) с выделением максимальных превышений фоновых показателей для каждого полигона свидетельствует об установлении наиболее приоритетных загрязнителей в отношении обследованных полигонов – никеля и хрома, характеризующихся первым классом опасности. Так, ранжирование полигонов ТКО по содержанию никеля выглядит следующим образом:

<u>Пинск</u>	<	<u>Брест</u>	<	<u>Кобрин</u>	<	<u>Береза</u>	<	<u>Лунина</u>
1,58		2,12		2,23		3,21		3,71

Ранжирование полигонов ТКО на наличие хрома представлено следующей последовательностью:

<u>Пинск</u>	<	<u>Кобрин</u>	<	<u>Брест</u>	<	<u>Лунина</u>	<	<u>Береза</u>
1,83		1,91		2,0		2,66		4,63

Заметное накопление данных элементов в слое почвы 2–10 см свидетельствует о преимущественно аэрогенном поступлении элементов в экосистему. Для почв зон влияния обследованных полигонов характерна никель-хромовая специализация.

Заключение

В результате анализа косвенных критериев установлено, что ни один из исследованных полигонов ТКО не попал в зону «Экологической нормы». К категории «Экологический риск» отнесены полигон ТКО г. Береза и полигон ТКО г. Барановичи. Категорией «Экологический кризис» характеризуются полигоны ТКО гг. Бреста, Пинска и полигон ТКО г. Лунина. Самая высокая категория экологической опасности (по косвенным критериям) характерна для полигона ТКО г. Кобрин.

При анализе прямых критериев установлено, что минимальное негативное влияние на подземные воды по содержанию макрокомпонентов и органических соединений оказывает полигон ТКО г. Береза, максимальное – полигон ТКО г. Бреста. Напротив, по степени микроэлементного загрязнения подземных вод весьма контрастная гидрохимическая аномалия наблюдается в локации полигона ТКО г. Береза. Наиболее благоприятная ситуация отмечена в зоне влияния полигона ТКО г. Кобрин, однако она может быть связана с недостатком наблюдательных скважин на границе полигона, что вынуждает использовать для сравнительных оценок данные скважин, удаленных на 80–100 м от периферии полигона, что вступает в противоречие с требованиями п. 5.6.12 ТКП 17.11-02–2009 (02120/02030).

Максимальное загрязнение почв характерно для импактных зон полигонов ТКО гг. Лунина и Береза, минимальное – в почвах зон влияния полигонов ТКО гг. Пинск и Барановичи. В целом, для почв импактных зон обследованных полигонов характерна никель-хромовая специализация.

В прогнозном аспекте можно предположить, что максимальная интегральная эмиссия загрязняющих веществ характерна для полигонов в стадии их жизненного цикла около 30-и лет (полигоны ТКО гг. Бреста, Барановичей, Лунина); к 50-и годам жизненного цикла наблюдается тенденция к сокращению эмиссий и стабилизации экологического состояния прилегающих территорий (полигоны ТКО гг. Кобрин, Пинск). Наиболее острые эколого-геохимические ситуации могут развиваться при поступлении на захоронение опасных веществ на восходящей стадии эксплуатации полигонов или их отдельных карт (первые 10 лет) вследствие короткого цикла трансформации загрязнителей в рабочем теле полигона малой мощности – полигон ТКО г. Береза. Таким образом, ранжирование обследованных полигонов ТКО по косвенным и прямым критериям свидетельствует о том, что с течением времени каждый из них в разной степени влияет на компоненты окружающей среды.

Библиографические ссылки

1. Лысухо НА, Ерошина ДМ. *Отходы производства и потребления, их влияние на природную среду. Монография.* Минск : МГЭУ им. А. Д. Сахарова; 2011. 210 с.
2. Ерошина ДМ, Ходин ВВ, Зубрицкий ВС, Демидов АЛ. *Экологические аспекты захоронения твердых коммунальных отходов на полигонах. Монография.* Минск : БелНИЦ «Экология»; 2010. 152 с.

3. Волчек АА, Безручко АВ. Экологическое состояние полигонов твердых коммунальных отходов Брестской области. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2022;2:117–122.
4. Богодяж ЕП, редактор. *Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2017 год*. Минск: [б. и.]; 2018. 450 с.
5. Saarela K-E, Harju L, Rajander J, Lill J-O, Heselius S-J, Lindroos A, Mattsson K. Elemental analyses of pine bark and wood in an environmental study. *Science of The Total Environment*. 2005;343(1–3):231–241.
6. Щербенко ТА, Копчик ГН, Гроненберг БЯ, Лукина НВ, Ливанцова СЮ. Поглощение элементов питания и тяжелых металлов сосной в условиях атмосферного загрязнения. *Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2008;2:9–16.
7. Виноградов АП. *Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах*. Москва: Издательство АН СССР; 1957. 235 с.
8. Бузина ИН, Пузик ВК. Состояние почв и оценка окружающей среды вокруг полигона твердых бытовых отходов. *Вестник БГСХА*. 2014;3:102–106.

References

1. Lysukho NA, Eroshina DM. *Otkhody proizvodstva i potrebleniya, ikh vliyanie na prirodnuyu sredu. Monografiya* [Waste from production and consumption, their impact on the natural environment]. Minsk: MGEU named after A. D. Sakharov; 2011. 210 p. Russian.
2. Eroshina DM, Khodin VV, Zubritskiy VS, Demidov AL. *Ekologicheskie aspekty zakhoroneniya tverdykh kommunal'nykh otkhodov na poligonakh. Monografiya* [Ecological aspects of solid municipal waste disposal at landfills]. Minsk: Belnits «Ecology»; 2010. 152 p. Russian.
3. Volchek AA, Bezruchko AV. *Ekologicheskoe sostoyanie polygonov tverdykh kommunal'nykh otkhodov Brestskoi oblasti* [The ecological state of landfills of solid municipal waste in the Brest region]. *Bulletin of the Brest State Technical University*. 2022;2:117–122. Russian.
4. Bogodyazh EP, editor. *Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus: rezul'taty nablyudeniya, 2017 god* [National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus: results of observations, 2017]. Minsk: [publisher unknown]; 2018. 450 p. Russian.
5. Saarela K-E, Harju L, Rajander J, Lill J-O, Heselius S-J, Lindroos A, Mattsson K. Elemental analyses of pine bark and wood in an environmental study. *Science of The Total Environment*. 2005;343(1–3):231–241.
6. Shcherbenko TA, Koptsik GN, Gronenberg BYa, Lukina NV, Livantsova SYu. *Pogloshchenie elementov pitaniya i tyazhelykh metallov sosnoi v usloviyakh atmosfernogo zagryazneniya* [Absorption of nutrients and heavy metals by pine in conditions of atmospheric pollution]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17. Soil Science*/ 2008;2:9–16. Russian.
7. Vinogradov AP. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and scattered elements in soils]. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1957. 235 p. Russian.
8. Buzina IN, Puzik VK. *Sostoyanie pochv i otsenka okruzhayushchei sredy vokrug polygona tverdykh bytovykh otkhodov* [Soil condition and environmental assessment around the landfill of solid household waste]. *Bulletin of the BGSXA*. 2014;3:102–106. Russian.

Статья поступила в редакцию 14.12.2024.
Received by editorial board 14.12.2024.

СОДЕРЖАНИЕ

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

<i>Ковалева Т. Г.</i> Роль и место переводческой практики специалиста-эколога на этапе углубленного высшего образования.....	4
--	---

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

<i>Алехнович А. В.</i> Динамика популяций широкопалого <i>Astacus astacus</i> , длиннопалого <i>Pontastacus leptodactylus</i> и полосатого <i>Faxonius limosus</i> раков в водоемах Беларуси.....	11
<i>Стригельская Н. П., Бученков И. Э., Чернецкая А. Г.</i> Состояние дендрофлоры некоторых парков г. Минска	22

РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Никитин А. Н., Тагай С. А., Мищенко Е. В., Леферд Г. А.</i> Влияние влажности почвы на распределение ¹³⁷ Cs между твердой и жидкой фазами на этапе отдаленных последствий загрязнения	31
<i>Герменчук М. Г.</i> Основные механизмы противостояния радиоэкологическим рискам и бедствиям.....	40
<i>Углянец А. В., Гарбарук Д. К.</i> Запасы ¹³⁷ Cs и ⁹⁰ Sr в лесных подстилках дубовых лесов ближней зоны Чернобыльской АЭС	52

МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Примакова Е. А., Кривенко С. И., Смольникова В. В., Назарова Е. А., Сыманович А. А., Юркина Е. Г., Дедюля Н. И., Романова И. А., Миланович Н. Ф.</i> Современные подходы к применению мезенхимальных стволовых клеток в онкогематологии.	68
<i>Страх А. А., Величко А. В., Нижегородова Д. Б., Зафранская М. М.</i> Роль белка Dkk3 в регуляции цитотоксичности лимфоцитов: систематический обзор	78

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Волчек А. А., Безручко А. В.</i> Методика комплексной оценки экологического состояния природно-техногенных геосистем и ее апробация в зонах влияния полигонов твердых коммунальных отходов Брестской области.	88
---	----

CONTENTS

SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

<i>Kovaleva T. G.</i> Role and place of translation practice of a specialist-ecologist at the stage of advanced higher education	4
--	---

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

<i>Alekhnovich A. V.</i> Population dynamics of noble <i>Astacus astacus</i> , narrow-clawed <i>Pontastacus leptodactylus</i> and spiny-cheek <i>Faxonius limosus</i> crayfish in water bodies of Belarus.	11
<i>Strigelskaya H. P., Buchenkov I. E., Chernetskaya A. G.</i> State of dendroflora of some parks in the city of Minsk	22

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

<i>Nikitin A. N., Tagai S. A., Mishchenko E. V., Leferd G. A.</i> Influence of soil moisture on the distribution of ^{137}Cs between the solid and liquid phases at the late stage of contamination consequences.	31
<i>Germenchuk M. G.</i> General mechanisms for countering radioecological risks and disasters.	40
<i>Uglyanets A. V., Garbaruk D. K.</i> Current stocks of ^{137}Cs and ^{90}Sr in forest litters of oak forests in the Chernobyl nuclear power plant near zone	52

MEDICAL ECOLOGY

<i>Prymakova E. A., Krivenko S. I., Smolnikova V. V., Nazarova E. A., Symanovich A. A., Yurkina E. G., Dedyulya N. I., Romanova I. A., Milanovich N. F.</i> Modern approaches to the use of mesenchymal stem cells in oncohematology	68
<i>Strakh A. A., Vialichka A. V., Nizheharodava D. B., Zafranskaya M. M.</i> Role of Dkk3 protein in regulation of lymphocyte cytotoxicity: systematic review.....	78

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

<i>Volchek A. A., Biazruchka A. B.</i> The method of comprehensive assessment of the ecological state of natural and man-made geosystems and its approbation in the zones of influence of landfills of solid municipal waste in the Brest region	88
--	----

Журнал включен Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований по биологическим, сельскохозяйственным и техническим (экология) наукам.

Журнал включен в библиографическую базу данных научных публикаций «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).

**Журнал Белорусского
государственного университета. Экология.
№ 2. 2025**

Учредитель:
Белорусский государственный университет

Юридический адрес: пр. Независимости, 4,
220030, Минск.

Почтовый адрес: ул. Долгобродская, 23/1,
220070, Минск.

Тел. 398-89-34, 398-93-44.

www.iseu.bsu.by

E-mail: jecology@bsu.by

«Журнал Белорусского государственного
университета. Экология» издается с сентября 2017 г.

До августа 2017 г. выходил под названием
«Экологический вестник»
(ISSN 1994-2087).

Редактор *Л. М. Корневская*
Технический редактор *М. Ю. Мошкова*
Корректор *Л. М. Корневская*

Подписано в печать 27.06.2025.
Тираж 100 экз. Заказ 574.

Республиканское унитарное предприятие
«Информационно-вычислительный центр
Министерства финансов Республики Беларусь»
ЛП № 02330/89 от 3 марта 2014.
Ул. Кальварийская, 17, 220004, Минск.

© БГУ, 2025

**Journal
of the Belarusian State University. Ecology.
No. 2. 2025**

Founder:
Belarusian State University

Registered address: 4 Niezaliežnasci Ave.,
220030, Minsk.

Correspondence address: 23/1 Daŭhabrodskaja Str.,
220070, Minsk.

Tel. 398-89-34, 398-93-44.

www.iseu.bsu.by

E-mail: jecology@bsu.by

«Journal of the Belarusian State University. Ecology»
published since September, 2017.

Until August, 2017 named «Ekologičeskii vestnik»
(ISSN 1994-2087).

Editor *L. M. Korenevskaya*
Technical editor *M. Yu. Moshkova*
Proofreader *L. M. Korenevskaya*

Signed print 27.06.2025.
Edition 100 copies. Order number 574.

RUE «Information Computing Center of the Ministry
of Finance of the Republic of Belarus».
License for publishing No. 02330/89, 3 March, 2014.
17 Kalvaryjskaya Str., 220004, Minsk.

© BSU, 2025