



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

---

3

2024

---

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.

*Либерамос 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

|                               |                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Editor-in-chief</b>        | <b>RODZKIN O. I.</b> , doctor of science (biology), docent; International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University, Minsk, Belarus.<br>E-mail: info@iseu.by                                    |
| <b>Deputy editor-in-chief</b> | <b>GERMENCHUK M. G.</b> , PhD (engineering), docent; deputy director for research of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University, Minsk, Belarus.<br>E-mail: germenchuk@iseu.by |
| <b>Executive secretary</b>    | <b>LOZINSKAYA O. V.</b> , senior lecturer at the department of general biology and genetics of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University.<br>E-mail: aromia@rambler.ru        |
| <br>                          |                                                                                                                                                                                                                           |
| <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 [37.017:811.1]:502.131.1

### ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ «ИНОСТРАННЫЙ ЯЗЫК» В КОНТЕКСТЕ ЦЕЛЕЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

О. Ю. ШИМАНСКАЯ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный педагогический университет им. Максима Танка,  
ул. Советская, 18, 220030, г. Минск, Беларусь

В условиях сокращения аудиторных часов, отводимых на изучение дисциплины «Иностранный язык» в системе общего высшего образования, запроса на усиление воспитательного потенциала учебных дисциплин и имплементацию идей образования в интересах устойчивого развития в образовательный процесс актуальной становится разработка компетентностно ориентированных заданий, которые позволяли бы одновременно реализовывать учебные и воспитательные задачи, а также цели устойчивого развития. В процессе критического и системного анализа требований, выдвигаемых образовательными стандартами, содержания учебного материала, а также рекомендаций программно-планирующей документации воспитания предложены варианты реализации задач образования в интересах устойчивого развития через содержание учебного материала и способы организации деятельности обучающихся в процессе изучения иностранного языка. Приведены примеры формулировки компетентностно ориентированных заданий, содержания воспитания и планируемых результатов для плана воспитательной и идеологической работы преподавателя. Для оценки эффективности реализации воспитательного потенциала учебной дисциплины «Иностранный язык» использован метод исследования действием, который заключался в постановке и решении воспитательных задач в системе педагогического иноязычного образования на кафедре иностранных языков филологического факультета Белорусского государственного педагогического университета.

---

#### Образец цитирования:

Шиманская ОЮ. Воспитательный потенциал учебной дисциплины «Иностранный язык» в контексте целей устойчивого развития. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;3:4–10.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-4-10>

#### For citation:

Shymanskaya OYu. Educational potential of the academic discipline «Foreign language» in the context of sustainable development goals. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;3:4–10. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-4-10>

---

#### Автор:

Ольга Юрьевна Шиманская – кандидат филологических наук, доцент; доцент кафедры иностранных языков, филологический факультет.

#### Author:

Olga Yu. Shymanskaya, PhD (philology), docent; associate professor at the department of foreign languages, faculty of philology.  
[shymans@bspu.by](mailto:shymans@bspu.by)

В статье впервые описан опыт реализации воспитательного потенциала учебной дисциплины «Иностранный язык» в контексте целей устойчивого развития. Приведены примеры форм интегрированного обучения иностранному языку: интеллектуальный батл «National history, heritage, and culture of Belarus», эстафета мнений «Экологические проблемы Республики Беларусь», мастер-класс «Spread Awareness, Spread Support», «Earth Quiz» на тему экологии и др. Представлена методика разработки проекта по созданию интерактивного коллажа. Даны формулировки тематики курсовых и дипломных работ, а также компетентностно ориентированных заданий для итоговой аттестации в контексте целей устойчивого развития. Предложенные формы, методы и приемы могут быть использованы преподавателями учреждений высшего образования для реализации воспитательного потенциала дисциплины «Иностранный язык» в контексте целей устойчивого развития.

**Ключевые слова:** метод исследования действием; высшее образование; образование в интересах устойчивого развития; воспитательная работа; компетентностный подход; иноязычное образование; информационно-образовательная среда.

## EDUCATIONAL POTENTIAL OF THE ACADEMIC DISCIPLINE «FOREIGN LANGUAGE» IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

O. Yu. SHYMANSKAYA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank,  
18 Saveckaja Street, Minsk 220030, Belarus*

Inspired by the reduction in classroom hours allocated for the discipline «Foreign Language» in the system of general higher education, as well as by the request for strengthening the educational potential of academic disciplines and the implementation of the ideas of education for sustainable development in the educational process, we suggest comprehensive value education approach. Comprehensive competency-based tasks should be developed to simultaneously implement learning objectives, value education objectives, and sustainable development goals. In the process of critical review of the requirements stipulated by educational standards, the content of the educational material, as well as the recommendations of the value education documentation, we suggest options for implementing the objectives of education for sustainable development through the learning content and through ways of organizing student activities. Examples illustrate how to develop competency-based tasks, formulate the content of education and the behavioral objectives for the teacher's ideological work plan. To assess the effectiveness of implementing the educational potential of the educational discipline «Foreign Language», the action research method was used, which implied solving educational problems in the system of pedagogical foreign language education. The novelty of the presented material is in the qualitative analysis of educational potential of the academic discipline «Foreign Language» in the context of sustainable development goals at the Department of Foreign Languages, Faculty of Philology, Belarusian State Pedagogical University. The following forms of content, language, and values integrated learning are described: intellectual battle «National history, heritage, and culture of Belarus», Relay of opinions «Ecological problems of the Republic of Belarus», Workshop «Spread Awareness, Spread Support», «Earth Quiz» on Ecology, etc. A rationale for creating an interactive collage is proposed. The paper provides sample coursework and diploma paper topics, as well as competency-based tasks for final certification in the context of sustainable development goals. The described forms, methods and techniques can be used by faculty and staff of tertiary institutions to implement the educational potential of the discipline «Foreign Language» in the context of sustainable development goals.

**Keywords:** action research; higher education; education for sustainable development; value education; competency-based approach; foreign language teaching; information-rich learning environment.

### Введение

В Концепции развития педагогического образования в Республике Беларусь на 2021–2025 годы<sup>1</sup> подчеркивается необходимость опережающего характера подготовки педагогов, обладающих высоким уровнем квалификации, гибкостью и адаптивностью, духовно-нравственными ценностями, готовых к постоянному самосовершенствованию и развитию. В числе общемировых образовательных приоритетов Концепцией называется реализация идей образования в интересах устойчивого развития (далее – ОУР)<sup>2</sup>.

Принимая во внимание значительный прогресс (почти 80 %) Республики Беларусь в достижении целей устойчивого развития, а также 99 % охват занятого населения общим средним и профессиональным образованием, можно утверждать, что качественное образование является приоритетным направлением

<sup>1</sup>Концепция развития педагогического образования в Республике Беларусь на 2021–2025 годы. Утв. Мин-вом образования 13.05.2021, № 366 [Электронный ресурс]. URL: <https://adu.by/images/2021/06/koncepcija-razvitija-pedagogicheskogo-obrazovanija.pdf> (дата обращения: 10.05.2024).

<sup>2</sup>Там же.

государственной политики [1]. Согласно И. В. Зубрилиной, которая является начальником действующего с 2017 г. Координационного центра «Образование в интересах устойчивого развития» учреждения образования «Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка» (далее – БГПУ), «цели устойчивого развития могут быть достигнуты лишь путем создания общества, которое активно и динамично адаптируется к новым условиям через тщательно продуманную и эффективную систему образования» [2].

Оценивая специфику внедрения идей ОУР в систему образования, И. В. Зубрилина указывает на его целостность, непрерывность и междисциплинарность, подчеркивая важность метапредметных взаимосвязей, инклюзивности, адаптивности, сотрудничества и учета локальной специфики [4]. Для продвижения целей устойчивого развития в системе образования создаются пилотные площадки и обновляется образовательная среда, а также условия для формирования системного, прогностического, критического и трехмерного мышления (экологического – экономического – социального), глобальной компетенции, гражданской ответственности и т. д. [2].

Изменение социокультурной ситуации и востребованность постоянных улучшений и развития делает необходимым «умножение внутренних ресурсов личности», формирование «функциональной грамотности, социально-личностной жизнеспособности, опережающего мышления и самоменеджмента, интеллектуального потенциала» [3].

Данные приоритеты обозначены и в Инструктивно-методическом письме «Организация воспитательной и идеологической работы в учреждениях высшего образования (далее – УВО) в 2023/2024 учебном году»<sup>3</sup> (далее – ИМП). В частности, в нем говорится о необходимости организации мероприятий, направленных на «популяризацию идей и целей устойчивого развития» и «пропаганду достижений устойчивого развития страны». Этим же документом предусмотрено составление отдельного «плана идеологической, воспитательной и общественной деятельности» преподавателя учреждения высшего образования, что ранее не требовалось<sup>4</sup>.

В условиях сокращения аудиторных часов, отводимых на изучение учебной дисциплины «Иностранный язык» в системе общего высшего образования, и запроса на усиление воспитательного потенциала учебных дисциплин и имплементацию идей ОУР в образовательный процесс актуальной становится разработка компетентностно ориентированных заданий, которые объединяли бы в себе три компонента – иноязычное образование, воспитание и ОУР. В данной статье мы ставим задачей рассмотреть методику разработки таких заданий и описать опыт их использования в рамках дисциплины «Иностранный язык».

## Материалы и методы исследования

Согласно И. В. Зубрилиной, внедрение идей ОУР в процесс непрерывного педагогического образования должно происходить не только на уровне содержания, но и в среде методологии [2]. В контексте ОУР осуществляется обучение критической постановке вопросов, осознанию собственных ценностей, формированию позитивного представления о будущем, системному мышлению, овладению прикладными знаниями, исследованию диалектической связи между традициями и инновациями [1].

В ИМП подчеркивается, что «содержание воспитательной работы в УВО должно отражать основные направления воспитания, зафиксированные в нормативных и инструктивно-методических документах Министерства образования Республики Беларусь, регламентирующих функционирование и развитие национальной системы образования, учитывающие актуальность, современные реалии и подходы в воспитании». Основной задачей ИМП является разъяснение содержания воспитания по каждому из приоритетных направлений воспитательной работы для администрации УВО, руководителей подразделений, кураторов и преподавателей<sup>5</sup>.

В разделе «Общие положения» приводится перечень онлайн-ресурсов и баз данных, которые рекомендуется использовать при организации воспитательной и идеологической работы, в разделе «Нормативное правовое обеспечение» перечислены «нормативные правовые документы, регламентирующие организацию воспитательного процесса в учреждениях, реализующих образовательные программы высшего образования». Важно отметить, что согласно ИМП, «все составляющие воспитания, предусмотренные Кодексом Республики Беларусь об образовании и Концепцией непрерывного воспитания детей и учащейся молодежи, обязательны для реализации в УВО»<sup>6</sup>.

Анализ содержания ИМП позволяет выделить несколько направлений воспитательной работы, которые лежат в сфере реализации задач ОУР:

<sup>3</sup>Инструктивно-методическое письмо «Организация воспитательной и идеологической работы в учреждениях высшего образования в 2023/2024 учебном году». Утв. Мин. обр. РБ 25.08.2023 [Электронный ресурс]. URL: <https://edu.gov.by/molodezhnaya-politika/glavnoe-upravlenie-vospitatelnoy-raboty-i-molodezhnoy-politiki/upr-molodezhi/informatsiya/materialy/metodicheskie-rekomendatsii/> (дата обращения: 10.05.2024).

<sup>4</sup>Там же.

<sup>5</sup>Там же.

<sup>6</sup>Там же.

- организация мероприятий, нацеленных на продвижение целей устойчивого развития и «достижений устойчивого развития Республики Беларусь»;
- реализация проектов экологической направленности и развитие экологического сознания и мышления;
- «формирование экологической культуры обучающихся, направленной на бережение природных ресурсов и охрану окружающей среды»;
- «формирование исследовательских умений обучающихся»<sup>7</sup>.

Для формулировки заданий по реализации воспитательного потенциала учебной дисциплины «Иностранный язык» в индивидуальном плане преподавателя или куратора, в плане воспитательной работы кафедры в контексте целей устойчивого развития рекомендуется использовать не только формулировки, предложенные в ИМП, но и Программы непрерывного воспитания детей и учащейся молодежи на 2021–2025 гг.<sup>8</sup>, поскольку в ней более подробно прописано содержание воспитания по каждому из направлений воспитательной работы, а также указываются образовательные результаты.

В данной статье представлен опыт реализации воспитательного потенциала учебной дисциплины «Иностранный язык» на кафедре иностранных языков филологического факультета БГПУ. Методологическую базу исследования составляют исследования в области ОУР, а также методика обучения иностранному языку в УВО. Для оценки эффективности реализации воспитательного потенциала учебной дисциплины «Иностранный язык» нами был использован метод исследования действием, который заключается в постановке и решении воспитательных задач в системе педагогического иноязычного образования.

В процессе критического и системного анализа требований, установленных образовательными стандартами, содержания учебного материала дисциплины, а также рекомендаций программно-планирующей документации воспитания нами разрабатывались компетентностно ориентированные задания для студентов, результаты выполнения которых оценивались с позиций компетентностного подхода в контексте реализации задач ОУР.

Методику разработки таких заданий можно представить в виде следующих шагов:

1. Изучение и профильная дифференциация рекомендаций ИМП.
2. Изучение содержания направлений воспитания в Программе непрерывного воспитания детей и учащейся молодежи на 2021–2025 гг.<sup>9</sup> и описанных предполагаемых образовательных результатов.
3. Изучение сущности и целей ОУР, а также специфики их внедрения в образовательный процесс.
4. Критический анализ содержания учебного материала дисциплины «Иностранный язык» с целью выявления тем, содержащих воспитательный компонент и компонент ОУР.
5. Разработка компетентностно ориентированных заданий, позволяющих реализовать воспитательный потенциал учебного материала в контексте целей устойчивого развития.

### Результаты исследования и их обсуждение

Согласно «Программе непрерывного воспитания детей и учащейся молодежи...», основными направлениями воспитания обучающихся являются идеологическое, гражданское и патриотическое, духовно-нравственное, поликультурное, эстетическое, семейное, экономическое, трудовое и профессиональное, а также воспитание психологической и физической культуры, направленное на формирование у обучающихся навыков здорового образа жизни и бережного отношения к окружающей среде и природопользованию, культуры безопасности жизнедеятельности, воспитание культуры быта и досуга<sup>10</sup>.

В пояснительной записке Примерной учебной программы по учебной дисциплине «Иностранный язык» для педагогических специальностей четко прописана задача ОУР: «Через комплексное метапредметное развитие у обучающихся цифровой и финансовой грамотности, политической и информационной культуры реализуется задача формирования трансверсальных компетенций поликультурной личности будущих специалистов»<sup>11</sup>.

Для реализации воспитательного потенциала учебной дисциплины «Иностранный язык» в контексте целей устойчивого развития наиболее подходящими, на наш взгляд, являются следующие темы,

<sup>7</sup>Инструктивно-методическое письмо «Организация воспитательной и идеологической работы в учреждениях высшего образования в 2023/2024 учебном году». Утв. Мин. обр. РБ 25.08.2023 [Электронный ресурс]. URL: <https://edu.gov.by/molodezhnaya-politika/glavnoe-upravlenie-vospitatelnoy-raboty-i-molodezhnoy-politiki/upr-molodezhi/informatsiya/materialy/metodicheskie-rekomendatsii/> (дата обращения: 10.05.2024).

<sup>8</sup>Программа непрерывного воспитания детей и учащейся молодежи на 2021–2025 гг. Утв. Мин. обр. РБ 31.12.2020, № 312 [Электронный ресурс]. URL: <https://edu.gov.by/molodezhnaya-politika/glavnoe-upravlenie-vospitatelnoy-raboty-i-molodezhnoy-politiki/upravlenie-raboty/informatsiya/programmy-vospitaniya/programma-vospitaniya-2021-2025.pdf> (дата обращения: 10.05.2024).

<sup>9</sup>Там же.

<sup>10</sup>Там же.

<sup>11</sup>Регистрационный № 6-05-01-025/пр. Иностранный язык. Примерная учебная программа по учебной дисциплине для специальностей. Утв. Мин-вом образования 22.02.2024 [Электронный ресурс] / сост. О. Ю. Шиманская, Ж. Я. Павлова. URL: [https://edustandart.by/media/k2/attachments/pr\\_inostrannyj-yazyk\\_BSPU\\_220224.pdf](https://edustandart.by/media/k2/attachments/pr_inostrannyj-yazyk_BSPU_220224.pdf) (дата обращения: 10.05.2024).

предусмотренные Примерной учебной программой: «Человек и его окружение. Семейные отношения и нравственные ценности: любовь, уважение, дружба. Мой дом. Мой район. Малая родина. Мой университет. История и персоналии. История Беларуси. Никто не забыт, ничто не забыто. Столица Республики Беларусь. Достопримечательности. Традиции и культура Беларуси. Национальные ценности. Личностные качества педагога / специалиста. Профессиональные компетенции современного педагога/специалиста. Трансверсальные компетенции. Значимые достижения и открытия в профессиональной области. Современные технологии в жизни и в образовании. Современные технологии и электронные ресурсы в профессиональной сфере. Индивидуальная образовательная траектория педагога. Непрерывное образование. Формы интеграции образования, науки и инновационной практики в рамках кластера непрерывного педагогического образования»<sup>12</sup>.

Как видно из приведенного перечня, в содержание обучения включены темы, касающиеся личностной и национальной самоидентификации, определения ценностей и качеств личности, профессионально ориентированные темы и темы развития компетенций (иноязычной, профессиональной, цифровой, образовательной). Рассмотрим формулировку компетентностно ориентированного задания по теме, а также пример его отражения в индивидуальном плане идеологической, воспитательной и общественной деятельности преподавателя. Первый пример отражает реализацию целей ОУР и воспитательных задач на основе содержания учебного материала.

Наименование дисциплины: «Иностранный язык». Содержание задания: Разработайте инфографику «Индивидуальная образовательная траектория педагога», отразив в ней ваши достижения, приоритеты и планы саморазвития. Используйте не менее двух приоритетных направлений Программы развития педагогического образования. Обсудите инфографику в группах, определите общие для группы ценности в профессиональной деятельности. Направление и содержание воспитания: профессиональное воспитание, экологическое воспитание. Планируемый результат: совершенствование профессиональной культуры обучающихся, готовности и стремления к профессиональному развитию; формирование ценностей устойчивого развития.

В рамках образовательного процесса осуществляется интегрированное обучение иностранному языку и учебному материалу. Преподавателями организуются различные мероприятия и формы аудиторной работы, направленные на реализацию целей образования в целях устойчивого развития. Примеры форм актуализации воспитательного потенциала учебной дисциплины «Иностранный язык» в контексте ОУР, реализованные на кафедре иностранных языков БГПУ:

- Интеллектуальный батл «National history, heritage, and culture of Belarus».
- Эстафета мнений «Экологические проблемы Республики Беларусь».
- Геймификация «In Search of Unknown Belarus».
- Информационно-просветительское мероприятие «World Autism Awareness Day».
- Мастер-класс «Spread Awareness, Spread Support».
- Воркшоп «Discover your Belarus».
- Презентация творческих проектов «My Motherland».
- Викторина «Earth Quiz» на тему экологии.

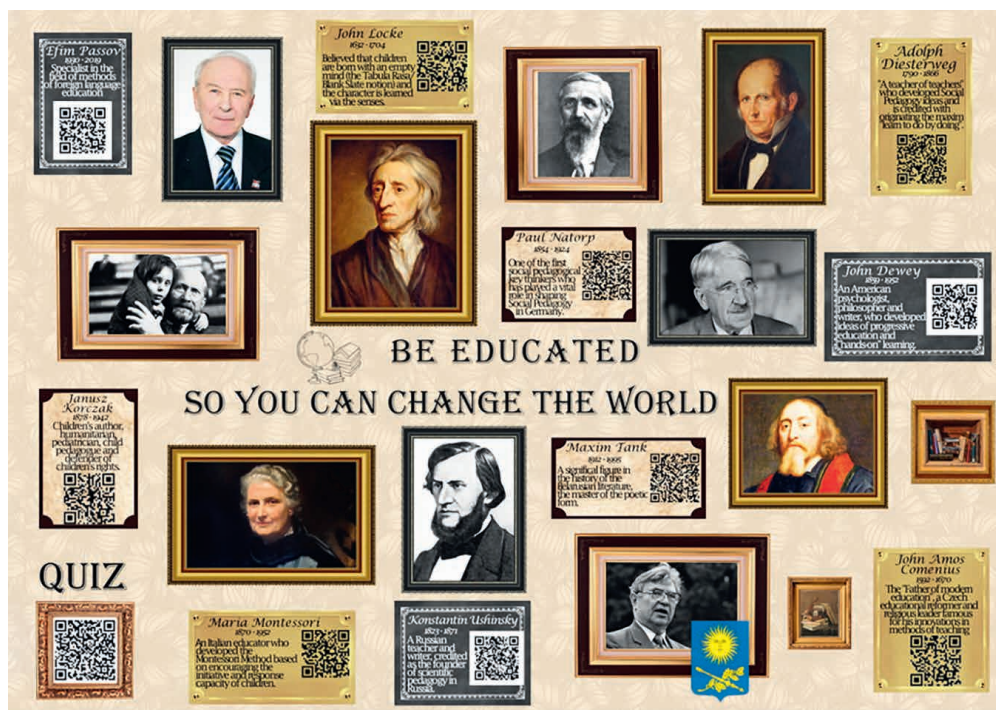
Внедрение указанных форм в образовательный процесс позволило повысить эффективность усвоения учебного материала и активизировать формирование личностных образовательных результатов. Студенты осваивают навыки критической постановки вопросов, планирования собственной деятельности, оценки достижений и саморазвития.

Описав способы реализации воспитательного потенциала учебной дисциплины «Иностранный язык» на основе предметного содержания, рассмотрим пример реализации целей ОУР через организационно-методический компонент информационно-образовательной среды (работа с цифровыми ресурсами, проблемное обучение, обучение в сотрудничестве). Наименование дисциплины: «Иностранный язык». Содержание задания: В группе разработайте интерактивный коллаж «Значимые достижения и открытия в профессиональной области»; используйте аутентичную информацию на иностранном языке, а также разработанные с использованием веб-ресурсов интерактивные задания. Направление и содержание воспитания: воспитание информационной культуры. Планируемый результат: совершенствование умений применять передовые достижения в области информационных технологий и создание собственного образовательно-информационного продукта.

На рис. представлен интерактивный коллаж, разработанный студентами 1 курса специальности «Социальная работа». Создание интерактивного коллажа – групповой проект, в котором каждый из студентов

<sup>12</sup>Регистрационный № 6-05-01-025/пр. Иностранный язык. Примерная учебная программа по учебной дисциплине для специальностей. Утв. Мин-вом образования 22.02.2024 [Электронный ресурс] / сост. О. Ю. Шиманская, Ж. Я. Павлова. URL: [https://edustandart.by/media/k2/attachments/pr\\_inostrannyj-yazyk\\_BSPU\\_220224.pdf](https://edustandart.by/media/k2/attachments/pr_inostrannyj-yazyk_BSPU_220224.pdf) (дата обращения: 10.05.2024).

готовил информацию об одном из известных педагогов, психологов, социальных работников, а также создавал QR-код со ссылкой на данную информацию. Каждый участник готовил один вопрос для последующего добавления в общую викторину (Quiz) по материалам коллажа.



Интерактивный коллаж «Социальная работа: выдающиеся персоналии»

Interactive collage "Social work: Outstanding Personalities"

Важно подчеркнуть, что интерактивный коллаж является одновременно результатом исследовательской работы студентов и ресурсом для самообразования. Зная досконально информацию, которую студент готовил сам, он может не знать о персоналиях, описанных другими. Таким образом, коллаж становится средством обучения, самообучения и взаимообучения. В результате реализации задач ОУР студент становится активным участником и координатором учения.

Формулировка компетентностно ориентированных заданий может осуществляться не только в рамках занятий по дисциплине «Иностранный язык», но также в ходе разработки тематики курсовых и дипломных работ по иностранному языку и методике его преподавания. Например, на кафедре разработаны следующие темы: «Гражданское и патриотическое воспитание на уроках иностранного языка в школе»; «Актуализация национального контента при обучении иностранному языку в школе»; «Формирование функциональной грамотности учащихся посредством учебного предмета "Иностранный язык"; «Формирование читательской грамотности при обучении иностранному языку в школе»; «Использование искусственного интеллекта в преподавании английского языка в школе»; «Применение веб-ресурсов для организации самостоятельной работы в процессе обучения китайскому языку в школе»; «Реализация задач экологического воспитания на уроках английского языка в школе»; «Применение здоровьесберегающих технологий на уроках английского языка в школе».

ОУР предполагает подготовку современного педагога, обладающего метапредметными компетенциями, способного адаптироваться к изменениям в образовательной среде, постоянно учиться и развиваться, применять знания и навыки для решения задач. В ходе итоговой аттестации по учебной дисциплине «Иностранный язык» студентам предлагается компетентностно ориентированное задание по методике преподавания иностранного языка. Такие задания разрабатываются с целью диагностики профессиональных компетенций выпускников, оценки их личностных качеств и сформированности ценностей устойчивого развития. Приводим примеры таких компетентностно ориентированных заданий.

Проанализируйте плюсы и минусы использования интерактивных викторин, созданных на платформах Quizizz, Kahoot и Learning Apps, для организации самостоятельной работы учащихся и контроля знаний. Какую из платформ Вы бы предпочли для создания викторины для онлайн-урока? Обоснуйте свой ответ.

Объясните, каким образом предметно-тематическое содержание общения, коммуникативные задачи и языковой материал по учебному предмету «Иностранный язык» способствует «достижению учащимися

личностных образовательных результатов»<sup>13</sup>. Дайте оценку изменениям, произошедшим в определении целей обучения иностранному языку за последнее десятилетие.

«Читательская грамотность на иностранном языке предполагает формирование умений прогнозировать, находить, сравнивать, оценивать и интерпретировать информацию, содержащуюся в различных аутентичных источниках»<sup>14</sup>. Каким образом можно развивать данные умения? Обоснуйте свой ответ.

«Читательская грамотность на иностранном языке предполагает формирование умения обосновывать и аргументировать свою точку зрения»<sup>15</sup>. Каким образом можно развивать данное умение на уроке иностранного языка? Обоснуйте свой ответ.

Согласно Инструктивно-методическому письму «Об организации образовательного процесса при изучении учебного предмета «Иностранный язык в 2023/2024 учебном году»<sup>16</sup> необходимо реализовывать воспитательный потенциал учебного данного учебного предмета. Каким образом можно выполнить данную рекомендацию? Обоснуйте свой ответ.

## Заключение

На основе проанализированного материала можно заключить, что воспитательный потенциал учебной дисциплины «Иностранный язык» в УВО реализуется через предметное и организационно-методическое содержание информационно-образовательной среды. Приоритеты государственной Программы воспитания детей и молодежи, рекомендации ИМП и цели ОУР необходимо системно интегрировать в образовательный процесс, реализуя их в разработках компетентностно ориентированных заданий, тематике проектов, курсовых и дипломных работ.

В результате реализации воспитательного компонента образовательного процесса происходит наращивание внутренних ресурсов личности обучающихся, формирование их активной жизненной позиции, гражданственности и патриотизма, необходимого багажа знаний и навыков для ведения здорового образа жизни, саморазвития и образования на протяжении всей жизни, создается безопасная благоприятная образовательная среда.

В статье отражена планомерная и творческая работа по реализации воспитательного потенциала иноязычного образования в контексте целей устойчивого развития, осуществляемая кафедрой иностранных языков филологического факультета БГПУ. Рассмотренные методические рекомендации могут быть использованы преподавателями УВО для реализации воспитательного потенциала дисциплины «Иностранный язык» в контексте целей устойчивого развития. Предложенные способы комплексной реализации образовательных, воспитательных задач и задач ОУР могут применяться для разработки заданий и форм деятельности в рамках других учебных дисциплин.

## Библиографические ссылки

1. Зубрилина ИВ. Идеи и ценности устойчивого развития в образовательном процессе. *Народная Асвета*. 2023;11:3–6.
2. Зубрилина ИВ. Имплементация идей образования в интересах устойчивого развития в национальную систему образования. *Адукацыя і выхаванне*. 2024;3:20–26.
3. Титовец ТЕ, Позняк АВ, Вершинина НА. Сущность и модель образовательной ситуации в контексте современного тезауруса педагогической науки. *Весті БДПУ. Серыя 1. Педагогіка. Псіхалогія. Філасофія*. 2021;2:11–14.
4. Зубрилина, ИВ. Компетенции педагога в области образования в целях устойчивого развития. *Адукацыя і выхаванне*. 2022;6:6–12.

## References

1. Zubrilina IV. *Idei i tsennosti ustoichivogo razvitiya v obrazovatel'nom protsesse* [Ideas and values of sustainable development in the educational process]. *Narodnaia Asveta* [People's Enlightenment]. 2023;11:3–6. Russian.
2. Zubrilina, IV. *Implementatsiya idei obrazovaniya v interesakh ustoichivogo razvitiya v natsional'nyu sistemu obrazovaniya* [Implementation of the ideas of education in the interests of sustainable development in the national education system]. *Adukatsia i vykhavanne* [Education and upbringing]. 2024;3:20–26. Russian.
3. Titovets TE, Pozniak AV, Vershinina NA. *Sushchnost' i model' obrazovatel'noi situatsii v kontekste sovremennogo tezaurusa pedagogicheskoi nauki* [The essence and model of the educational situation in the modern Pedagogy thesaurus]. *Vesti BDPU. Seriya 1. Pedagogika. Psichalogia. Filasofia* [BSPU Bulletin. Vol. 1. Pedagogy. Psychology. Philosophy]. 2021; 2:11–14. Russian.
4. Zubrilina I. V. *Kompetentsii pedagoga v oblasti obrazovaniya v tselyakh ustoichivogo razvitiya* [Competencies of a teacher in the field of education for development] *Adukatsia i vykhavanne* [Education and upbringing]. 2022;6:6–12. Russian.

Статья поступила в редколлегию 16.05.2024.  
Received by editorial board 16.05.2024.

<sup>13</sup> Особенности организации образовательного процесса при изучении учебного предмета «Иностранный язык» в 2023/2024 учебном году. Утв. Министерством образования Республики Беларусь 31.07.2023 [Электронный ресурс]. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=u02301696> (дата обращения: 10.05.2024).

<sup>14</sup> Там же.

<sup>15</sup> Там же.

<sup>16</sup> Там же.

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОЗНАНИЯ В ПРАКТИКЕ ПРЕПОДАВАНИЯ ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

Ю. И. БУТКЕВИЧ<sup>1)</sup>

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

Интеграция экологических образовательных компонентов в практику преподавания иностранных языков открывает широкие возможности для формирования экологического сознания учащихся. Рассматриваются методологические основания, обеспечивающие данный процесс. Осмысливаются принципы, лежащие в основе включения экологической тематики в лингвистические дисциплины, а также определяющие эффективную интеграцию экологического содержания и целей обучения языку с опорой на междисциплинарные подходы, педагогические теории и практические стратегии. Выделяются методологические основы наиболее эффективных исследовательских практик в области преподавания языков и экологического образования, а также дается характеристика новых тенденций и инноваций в обеих областях. Рассматриваются такие различные педагогические модели, как проектное обучение (PBL), интегрированное обучение содержанию и языку (CLIL), преподавание языка на основе задач (TBLT), перевернутый класс (Flipped classroom). Раскрываются механизмы, способствующие одновременному развитию экологического сознания, языковой компетенции и навыков критического мышления. Уделено внимание демонстрации ключевой роли педагогов в создании значимого опыта обучения, способствующего бережному отношению к окружающей среде и межкультурному взаимопониманию. Подчеркивается важность создания образовательной среды, в которой учащимся предлагается изучать экологические темы с помощью аутентичного использования языка, тем самым формируя более глубокое понимание экологической проблематики. Проиллюстрировав методологические основы через призму конкретных методов преподавания английского языка, раскрываются практические стратегии, позволяющие органично интегрировать языковое образование с формированием экологического сознания. Демонстрируя значение инновационных методов преподавания и возможностей экспериментального обучения, иллюстрируется, как преподаватели иностранных языков могут внести экологические темы в свои учебные программы, давая студентам возможность стать не только информированными, но сознательными сторонниками стратегии устойчивого развития и экологической справедливости. Раскрываются возможности, возникающие в результате объединения языкового образования и процесса формирования экологического сознания. Обосновывается эффективность принятия целостного подхода к обучению, который преодолевает дисциплинарные границы и вооружает студентов лингвистическими, когнитивными и социально-экологическими компетенциями, необходимыми для самореализации во все более динамично меняющемся и взаимосвязанном мире.

**Ключевые слова:** экологическое сознание; методика преподавания; экологическое образование; междисциплинарные подходы; проектное обучение; интегрированное обучение содержанию и языку; преподавание языка на основе задач; перевернутый класс.

### Образец цитирования:

Буткевич ЮИ. Методологические основы формирования экологического сознания в практике преподавания лингвистических дисциплин. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;3:11–16.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-11-16>

### For citation:

Butkevich YuI. Methodological foundations of the formation of environmental awareness in the practice of teaching linguistic disciplines. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;3:11–16. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-11-16>

### Автор:

**Юлия Игоревна Буткевич** – старший преподаватель кафедры лингвистических дисциплин и межкультурных коммуникаций.

### Author:

**Yuliya I. Butkevich**, senior teacher at the department of linguistic disciplines and intercultural communications.  
[englishbutkevich@mail.ru](mailto:englishbutkevich@mail.ru)

## METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF THE FORMATION OF ENVIRONMENTAL AWARENESS IN THE PRACTICE OF TEACHING LINGUISTIC DISCIPLINES

Yu. I. BUTKEVICH<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,  
23/1 Dauhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus*

The integration of ecological educational components into the practice of teaching foreign languages opens wide opportunities for the formation of students' environmental consciousness. This article discusses the methodological foundations that ensure this process. First of all, the principles underlying the inclusion of ecological topics in linguistic disciplines and determining the effective integration of ecological content and language teaching objectives based on interdisciplinary approaches, pedagogical theories and practical strategies are conceptualized. In addition, the methodological foundations of the most effective research practices in language teaching and environmental education are highlighted, and new trends and innovations in both fields are characterized. The article elaborates on different pedagogical models such as Project Based Learning (PBL), Content and Language Integrated Learning (CLIL), Task Based Language Teaching (TBLT), Flipped classroom and reveals the mechanisms that promote the simultaneous development of environmental awareness, language competence and critical thinking skills. Special attention is paid to demonstrating the key role of educators in creating meaningful learning experiences that promote environmental stewardship and intercultural understanding. The article emphasizes the importance of creating an educational environment in which students are encouraged to learn about environmental topics through authentic language use, thereby developing a deeper understanding of environmental issues. By illustrating the methodological framework through the lens of specific English language teaching methods, the article reveals practical strategies for seamlessly integrating language education with the formation of environmental awareness. Demonstrating the value of innovative teaching methods and experiential learning opportunities, the article shows how language teachers can effectively weave environmental themes into their curricula, empowering students to become not only informed but conscious advocates of sustainable development strategies and environmental justice. This article reveals a number of possibilities that arise from combining language education and the process of building environmental awareness. It substantiates the effectiveness of adopting a holistic approach to learning that transcends disciplinary boundaries and equips students with the linguistic, cognitive and socio-environmental competencies necessary for self-actualization in an increasingly dynamic and interconnected world.

**Keywords:** environmental awareness; teaching methodology; environmental education; interdisciplinary approaches; project-based learning; content-language integrated learning; task-based language teaching; flipped classroom.

### Введение

Человек является частью природы и не может существовать вне ее. Поэтому складывающаяся на конкретных этапах развития человечества система отношений между обществом и природой выступала одним из важнейших факторов, определяющих не только перспективы социального прогресса, но, зачастую, и саму возможность дальнейшего существования конкретных цивилизаций. Эта система отношений определяется как совокупностью технических и социально-экономических компонентов, которыми человечество обладает, так и социально-психологическими и мировоззренческими установками, присущими конкретному социуму. Причем значение последних возрастает с ростом возможностей общества воздействовать и изменять окружающую природу. Это стало очевидным уже в начале XX в. Сформировавшаяся в эпоху Возрождения социальная парадигма отношения к природе только как к «мастерской для человека» была шагом вперед в сравнении с теоцентризмом средних веков. Однако с течением времени все больше стали проявляться и негативные аспекты такого одностороннего подхода. И уже промышленная революция XIX – начала XX в. привела к резкому ухудшению состояния окружающей нас среды. Первоначально это касалось только крупных индустриальных центров, где существенно изменялся микроклимат и ухудшались условия жизни человека. Но во второй половине XX в. данная проблема приобрела уже глобальный характер. Попытки трансформировать укоренившееся отношение к природе с помощью ограничительных мер оказываются тщетными. В этой связи достаточно остро встала проблема выработки нового системного подхода к пониманию окружающей нас природы и взаимодействию с ней. Формирование концепции, а затем и принятие программы устойчивого развития на международном уровне, разработка теории коэволюции человека и природы показали, что для функционирования цивилизации необходимо менять базовые установки общественного сознания. Очевидной стала потребность в выработке новой формы общественного сознания – экологической. А достижение этой цели невозможно без включения экологической проблематики в образовательный процесс на всех его уровнях. В обществе растет спрос на экологически ориентированное образование, в котором особое внимание уделяется привитию молодому поколению культуры гармоничного взаимодействия с миром природы.

## Материалы и методы исследования

Теоретические основы процесса интеграции экологического сознания в лингвистическое образование изучаются в таких дисциплинах, как эколингвистика и социоллингвистика.

Эколингвистика – это междисциплинарная область, изучающая сложные взаимоотношения между языком и окружающей средой. Она исследует, как язык отражает и влияет на восприятие, отношение к природе и поведение человека в естественной среде, а также включает в себя анализ языковых особенностей, отражающих различные культурные установки по отношению к природе, например, наличие специфических экологических терминов в разных языках или использование метафор, связанных с природой, в литературе. Ученые-эколингвисты раскрывают процессы влияния языка на наше понимание окружающей среды и его роль в создании культурных нарративов и представлений о природе. Анализируя языковые модели, термины и понятия, связанные с окружающей средой, эколингвистика стремится выявить способы, с помощью которых язык формирует наше экологическое сознание и природоохранные практики [1]. В контексте лингвистического образования эколингвистика может способствовать разработке учебных программ, подчеркивая важность интеграции экологических тем в материалы для преподавания языка. Это может включать в себя создание уроков, которые исследуют лингвистическое разнообразие экологической терминологии или анализ экологического дискурса в различных языковых контекстах. Эколингвистика поощряет критическое мышление в отношении роли языка в формировании отношения к окружающей среде. Изучая, как язык может отражать и закреплять доминирующие представления о природе, преподаватели могут помочь учащимся лучше понять экологические проблемы и то, как язык может влиять на восприятие и поведение.

Социоллингвистика раскрывает процессы и способы отражения и формирования с помощью языка отношения общества к природе. Язык в данном контексте понимается как средство коммуникации и инструмент передачи культурных ценностей, убеждений и динамики власти в обществе. Социоллингвистика изучает, как использование языка варьируется в различных социальных группах и контекстах. Сюда входит анализ факторов возраста, пола, этнической принадлежности и социального класса, влияющих на языковую практику, связанную с окружающей средой, например, использование экологического жаргона или участие в экологическом дискурсе. Понимая социальные аспекты использования языка, преподаватели могут разработать стратегии для включения экологического сознания в лингвистическое образование. Это может включать в себя разработку мероприятий, побуждающих студентов изучать экологические последствия выбора языка, или анализ роли языка в формировании экологической политики. Социоллингвистические теории (лингвистическая относительность и лингвистический детерминизм) показывают влияние языка на наше восприятие и концептуализацию мира, включая наши отношения с окружающей средой. Используя язык, люди и сообщества договариваются о своей идентичности, отношениях и взаимодействии с миром природы. Социоллингвистический анализ также показывает, как язык укрепляет доминирующие экологические парадигмы и выстраивает социальную иерархию на основе экологических знаний и практик [2].

Основываясь на выводах вышеназванных теоретических дисциплин, педагоги могут глубже понять роль языка в формировании экологического сознания и отношения к окружающей среде. Интеграция идей эколингвистики и социоллингвистики в преподавание языка позволяет обогатить понимание студентами сложной взаимосвязи между языком, культурой и окружающей средой. Это также может помочь студентам критически анализировать экологические парадигмы, оспаривать или принимать их и формировать в своем сознании обоснованные и устойчивые эколингвистические модели.

Современная цивилизация сталкивается с такими многочисленными экологическими проблемами, как изменение климата, утрата биоразнообразия и загрязнение окружающей среды. Повышение экологической грамотности студентов помогает им осознать актуальность и сложность этих проблем, что дает им возможность повысить свою информированность и социальную активность в решении актуальных экологических проблем.

Интеграция экологических тем в практику преподавания языка является эффективным способом вовлечения студентов в содержательный учебный процесс, а также повышения их осведомленности об экологических проблемах и в конечном итоге формирует у них элементы экологического сознания. Охарактеризуем некоторые педагогические подходы, применяемые в практике преподавания лингвистических дисциплин:

1. Проектно-ориентированное обучение (Project-Based Learning – PBL) – это стратегия обучения, при которой студенты учатся, активно участвуя в реальных и значимых проектах. В рамках PBL студенты работают над проектами, в центре которых находятся сложные вопросы, проблемы или задачи, требующие критического мышления, решения проблем, сотрудничества и творческого подхода. Являясь одной из инновационных педагогических технологий, проектный метод помогает развивать когнитивные навыки

студентов, способность самостоятельно мыслить, проявлять творческий подход и инициативу, ставить проблему и находить ее решения, ориентироваться в информационном пространстве и уметь отбирать достоверную, репрезентативную и актуальную информацию, способность обрабатывать и анализировать этот медиаконтент, прогнозировать и оценивать результаты своей работы. Одно из преимуществ проектного метода перед другими образовательными технологиями заключается в том, что он способствует развитию самостоятельной деятельности студентов, индивидуально или в группах, их аналитических и творческих навыков и ориентирует на дальнейшую исследовательскую работу [3].

Одна из форм, реализуемая в рамках данной стратегии обучения, – защита языкового проекта по темам научных интересов или курсовых работ. На подготовительном этапе студенты обсуждают возможные сферы деятельности своего проектного исследования, определяют цели и задачи проекта. На втором этапе студенты работают над проектом, планируют, собирают и анализируют материал, проводят исследования и изучают опыт исследований подобного рода. Третий этап – демонстрация и защита языкового проекта на английском языке. Проект может быть представлен в виде презентации *PowerPoint* в классе, или студенты могут создать реальные страницы в социальных сетях, которые привлекут реальных подписчиков и покажут реальную обратную связь аудитории. Заключительным этапом является оценка проекта преподавателями и обмен отзывами, когда студенты делятся своими впечатлениями о проделанной работе, обсуждают их роль и вклад в проект.

2. Предметно-языковое интегрированное обучение, или Content-Language Integrated Learning (CLIL) – один из самых распространенных и эффективных подходов в обучении иностранным языкам, в том числе английскому. Многие преподаватели успешно используют темы и материалы других предметов на уроках, даже не подозревая, что у этой методики есть название.

Термин Content and Language Integrated Learning сформулировал Дэвид Марш в 1994 г., но на самом деле этот метод распространен еще с древних времен [4]. Ключевые принципы подхода предметно-языкового интегрированного обучения базируются на двух основных понятиях – «язык» и «интеграция».

CLIL условно делят на *hard CLIL* и *soft CLIL*. *Hard CLIL* означает, что любой изучаемый предмет может проходить на английском языке (при условии, что он является вторым языком для учащихся). В ходе такого урока ученики знакомятся с географией, литературой, биологией, физикой или даже спортивными играми посредством иностранного языка.

Преподаватели английского языка традиционно используют *soft CLIL* для изучения иностранного языка с помощью тем и материалов из других предметов. В институте МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ данная методика используется в контексте курса профессионального английского для биологов, экологов, инженеров-программистов, специалистов по природоохранной деятельности и ядерной безопасности.

Причина широкого распространения и популярности этого подхода в том, что CLIL расширяет межкультурные знания учащихся; тренирует навыки общения на иностранном языке в естественных условиях; способствует развитию мышления и открывает творческий потенциал студентов; повышает мотивацию студентов и их уверенность в себе; тренирует все языковые навыки и умения; улучшает языковую компетенцию и навыки естественной устной речи; развивает интерес к разным языкам, к использованию их в разных сферах жизни; позволяет учащимся более эффективно общаться друг с другом, используя иностранный язык; не требует дополнительных часов обучения.

В области интегрированного обучения профессор Д. Койл, известный исследователь, выделяет три модели CLIL [4].

Модель С1: многоязычное образование. В этом сценарии при преподавании различных предметов в течение всего периода обучения используются различные иностранные языки. Такой подход позволяет студентам по завершении всей учебной программы получить профессиональные знания на нескольких языках. Кроме того, он направлен на привлечение наиболее мотивированных и талантливых студентов из разных стран.

Модель С2: вспомогательное / дополнительное интегрированное изучение предметов и языков. Эта модель предполагает одновременное преподавание предметов с акцентом на развитие знаний и навыков, необходимых для использования языка в когнитивных процессах более высокого порядка. Преподавание языка адаптировано к конкретным предметным областям, поэтому преподаватели иностранных языков, интегрированные в специализированные учебные подразделения, оказывают внешнюю поддержку в подготовке специалистов. Благодаря предметно-языковой интеграции студенты овладевают навыками использования иностранного языка в рамках своей специальности.

Модель С3: предметные курсы с языковой поддержкой. Программы обучения направлены не только на повышение профессиональных компетенций, но и на развитие языковых навыков. В этой модели обучение проводят эксперты в предметной области, а также специалисты по языковому образованию. Даже студенты с ограниченным знанием языка получают помощь на протяжении всего учебного процесса, что

позволяет им овладеть как предметом, так и языком обучения. Эта модель рассчитана на студентов с разным уровнем владения языком.

Модель C1 менее распространена, так как реализуется, в основном, в узкоспециализированных университетах.

Интегрированное предметное и языковое обучение в университетах – это развивающаяся область теоретических и практических исследований. Не существует общепринятых рамок для внедрения такого обучения в университетах. Каждое учреждение высшего образования имеет свои уникальные условия, которые определяют решения выбора подходов и методик обучения студентов на дополнительном или неродном языке.

3. Преподавание языка на основе задач (Task-Based Language Teaching – TBLT) – это подход, который предлагает студентам возможность активно участвовать в общении для достижения цели или выполнения задания. TBLT направлено на развитие межъязыковой речи учащихся путем постановки задачи и последующего использования языка для ее решения.

При обучении языку с использованием заданий основное внимание уделяется не грамматике, поскольку студенты уже ранее познакомились с конструкциями и необходимой лексикой, а помощи студентам в разработке лингвистических стратегий для выполнения поставленных задач в рамках того, что они знают об изучаемом языке. Поскольку акцент делается на спонтанном, творческом использовании языка, будь то устная или письменная речь, а не на абсолютной точности, оценка основывается на результатах выполнения заданий. TBLT строится на следующих методологических и методических принципах: для изучения языка важна деятельность, предполагающая реальное общение; деятельность, в которой язык используется для выполнения значимых задач, способствует обучению; язык, значимый для учащегося, поддерживает процесс обучения [5].

Рассмотрим данный подход на примере ролевой игры. Ролевая игра – это способ проработки ситуации, сценария или проблемы путем принятия ролей и отработки того, что нужно делать в безопасной обстановке. Этот метод обучения способствует более глубокому вовлечению учащихся в образовательный процесс и развивает их более широкие и сложные знания о предмете. Более того, ролевые игры повышают интерес и мотивацию учащихся, создают как эмоциональную, так и интеллектуальную привязанность к предмету.

В качестве одного из примеров применения этого метода мы можем указать на то, что студенты получают ситуацию с описанием какой-либо экологической катастрофы в конкретном регионе. Они должны проанализировать ее и перечислить вредные воздействия, которые будут в результате, выделить возможные наихудшие сценарии ее последствий и категории пострадавших людей. Учащиеся разрабатывают план действий из краткосрочных и долгосрочных задач, определяют приоритеты наиболее неотложных из них, назначают ответственных лиц для решения проблемы. Распределяемые роли могут варьироваться от высокого правительственного уровня до местных органов власти и граждан, а также прессы и неправительственных организаций, которые в форме круглого стола, конференции или саммита обсуждают план совместных действий, приводят разумные аргументы и пытаются воспроизвести реальную встречу и дебаты.

4. «Перевернутый класс» (Flipped classroom) – это педагогическая модель, в которой типичные элементы лекций и домашних заданий курса меняются местами. Короткие видеолекции студенты просматривают дома перед занятием в аудитории, в то время как в классе время посвящено упражнениям, проектам, или обсуждениям. Видеолекция часто рассматривается как ключевой компонент в перевернутом обучении. Такие лекции либо создаются преподавателем и размещены в Интернете, либо выбраны из онлайн-репозитория. Понятие перевернутого обучения опирается на такие понятия, как активное обучение, вовлечение студентов, дизайн гибридного курса. Ценность перевернутого обучения заключается в перепрофилировании классного времени на занятия, где студенты могут узнать о содержании темы, развить свои навыки в применении знаний и взаимодействовать друг с другом в практической деятельности. Во время занятий преподаватели действуют как инструкторы, поощряя студентов в индивидуальных исследованиях и совместных усилиях.

В процессе обучения происходит смещение акцентов в образовательном процессе. Так, традиционное обучение обладает линейностью, не допускает (многократного при необходимости) возвращения к уже пройденному материалу, а технология «перевернутого обучения» позволяет студентам самостоятельно выбирать оптимальный ритм освоения учебного материала. Студенты могут просматривать учебное видео в автономном режиме вне зависимости от сложившейся ситуации. Кроме того, студенты могут организовать видеоконференцию без участия преподавателя, обсудить и совместно выполнить задания. Так, изучение теоретического материала осуществляется обучающимися через работу с онлайн-ресурсами, предоставляемыми преподавателем, а аудиторная работа сконцентрирована на выполнении практических заданий непосредственно под его руководством. Использование технологии «перевернутого обучения» в учебном процессе предполагает:

1. Создание преподавателем «виртуальной» образовательной среды, наполняемой презентациями, аудио- и видеоматериалами, интерактивными заданиями, доступными вне зависимости от временных и пространственных локаций.

2. Осуществление текущей и итоговой эволюции полученных студентами компетенций через выбор нескольких форм выполнения итоговой работы.

3. Овладение иностранным языком для возможности коммуникации и получения информации из аутентичных источников.

Такого рода методы, применяемые при обучении английскому языку, ставят учащихся в конкретную ситуацию, где они могут брать на себя разные роли и выполнять конкретные задачи. Студенты могут попробовать себя в принятии ответственности за принятие решений и развить свои «мягкие навыки». Более того, студенты сами создают реальную коммуникативную ситуацию, в которой они могут получить множество возможностей применить лексику, рассмотренную и изученную на предыдущих уроках, выучить новые лексические единицы, применить знания, полученные по другим предметам, попрактиковать свои дипломатические навыки и навыки ведения переговоров. Аутентичное и спонтанное общение в квазиреалистичных ситуациях, связанных с будущей профессией, не только позволяет студентам практиковаться в использовании языка в зависимости от контекста, но и оживляет атмосферу преподавания, пробуждает интерес к учебе и делает весь процесс увлекательным. Учащиеся также могут интегрировать свой опыт и свою точку зрения в построение ситуаций ролевой игры, разрабатывая свои собственные кейсы для ролевых игр.

### Заключение

Вышеназванные методологические основания позволяют активизировать формирование экологического сознания в процессе преподавания лингвистических дисциплин. Применяя междисциплинарные подходы, используя инновационные педагогические модели и реализуя эффективные практические стратегии, преподаватели могут создавать погружающий опыт обучения, который позволяет учащимся сформировать активную социальную позицию по отношению к современным экологическим проблемам.

Таким образом, формируются социально-психологические и лингвокультурные основания для понимания целей устойчивого развития и стратегий решения экологических проблем.

### Библиографические ссылки

1. Брусенская ЛА, Куликова ЭГ. *Экологическая лингвистика. Монография*. Москва: ФЛИНТА: Наука; 2018. 184 с.
2. Аюпова ЛЛ, Салихова ЭА. *Социоллингвистика*. Уфа: Восточный университет; 2006. 152 с.
3. Халыпина ЛП. Поликультурная языковая личность и способы ее формирования в процессе обучения иностранным языкам. В: *Библиографический указатель ИНИОН «Деponированные научные работы», раздел «Языкознание»*. 2015;7:33–34.
4. Coyle D, Hood Ph, Marsh D. CLIL: Content and Language Integrated Learning. Cambridge: Cambridge University Press; 2010. 138 p.
5. Андриухина ЛМ, Фадеева НЮ, Де Негри Ж. Развитие экологической культуры студентов в процессе межкультурной коммуникации на иностранном языке. *Образование и наука*. 2017;19(8):47–74. <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2017-8-47-74>

### References

1. Brusenskaya LA, Kulikova EG. *Ekologicheskaya lingvistika. Monografiya* [Ecological linguistics. Monograph]. Moscow: FLINT: Nauka; 2018. 184 p.
2. Ayupova LL, Salikhova EA. *Sotsiolingvistika* [Sociolinguistics]. Ufa: Oriental University; 2006. 152 p.
3. Khalyapina LP. *Polikul'turnaya yazykovaya lichnost' i sposoby ee formirovaniya v protsesse obucheniya inostrannym yazykam*. V: *Bibliograficheskii ukazatel' INION «Deponirovannye nauchnye raboty», razdel «Yazykoznanie»* [Multicultural linguistic personality and ways of its formation in the process of teaching foreign languages. In: Bibliographic index of INION «Deposited scientific papers», section «Linguistics»]. 2015;7: 33–34. Russian.
4. Coyle D, Hood Ph, Marsh D. CLIL: Content and Language Integrated Learning. Cambridge: Cambridge University Press; 2010. 138 p.
5. Andriukhina LM, Fadeeva NY, De Negri J. *Razvitie ekologicheskoi kul'tury studentov v protsesse mezhkul'turnoi kommunikatsii na inostrannom yazyke* [The development of ecological culture of students in the process of intercultural communication in a foreign language]. *Education and science*. 2017;19(8):47–74. <https://doi.org/10.17853/1994-5639-2017-8-47-74>

Статья поступила в редакцию 16.05.2024.  
Received by editorial board 16.05.2024.

---

# ИЗУЧЕНИЕ

# И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

---

## THE STUDY

## AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

---

УДК 581.9(476)

### ФЛОРИСТИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ЛУГОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПОЙМЫ РЕКИ ДНЕПР В ПРЕДЕЛАХ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

К. В. ДОБЫШ<sup>1)</sup>, Е. Я. КУЛИКОВА<sup>1)</sup>, Г. В. ЕРМОЛЕНКОВА<sup>1)</sup>

Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича, Национальная академия наук Беларуси,  
ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Беларусь

На основе обработки 518 геоботанических описаний луговой растительности поймы р. Днепр (территория Беларуси) выявлен 381 вид сосудистых растений, относящийся к 208 родам и 70 семействам. Отдел хвощеобразные (Equisetophyta) представлен 4 видами, папоротникообразные (Polypodiophyta) – 3 видами, голосеменные (Pinophyta) – 1 видом и покрытосеменные (Magnoliophyta) – 373 видами. Десять ведущих семейств включают 228 видов, что составляет больше половины всех видов ценофлоры луговой растительности р. Днепр (59,8 %). Исследуемая ценофлора относится к *Cyperaceae*-типу (арктобореально-восточноазиатскому) и *Rosaceae*-подтипу (условно-европейскому). Показаны особенности флористического состава пойменных луговых сообществ в зависимости от экологических

---

#### Образец цитирования:

Добыш КВ, Куликова ЕЯ, Ермоленкова ГВ. Флористическое разнообразие луговой растительности поймы реки Днепр в пределах Республики Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;3:17–32. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-17-32>

#### For citation:

Dobysh KV, Kulikova EYa, Ermolenkova GV. Floristic diversity of grassland vegetation of the Dnepr river floodplain within the Republic of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;3:17–32. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-17-32>

---

#### Авторы:

**Константин Викторович Добыш** – аспирант; младший научный сотрудник лаборатории геоботаники и картографии растительности.

**Елена Ярославовна Куликова** – кандидат биологических наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории геоботаники и картографии растительности.

**Галина Васильевна Ермоленкова** – научный сотрудник лаборатории геоботаники и картографии растительности.

#### Authors:

**Konstantin V. Dobysh**, graduate student; junior researcher at the laboratory of geobotany and vegetation mapping.

[skost@mail.ru](mailto:skost@mail.ru)

**Elena Ya. Kulikova**, PhD (biology), docent; leading researcher at the laboratory of geobotany and vegetation mapping.

[kulikova22@mail.ru](mailto:kulikova22@mail.ru)

**Galina V. Ermolenkova**, researcher at the laboratory of geobotany and vegetation mapping.

[galina-0602@mail.ru](mailto:galina-0602@mail.ru)

условий их формирования и режима использования. Объем ценофлоры класса *Molinio-Arrhenatheretea* (329 видов) значительно превышает объем ценофлоры класса *Phragmito-Magnocaricetea* (210 видов), что свидетельствует о значительном превышении видового богатства остепненных и настоящих лугов над болотистыми и торфянистыми. Выявлено изменение ценотической значимости отдельных видов растений на исследуемых пойменных лугах. В луговых фитоценозах поймы р. Днепр отмечено 48 доминантных видов растений, из которых злаки составляют 25 видов (52 %), осоки – 12 (25 %), разнотравье – 11 видов (23 %). В сообществах класса *Phragmito-Magnocaricetea* доминируют *Carex acuta*, *Phalaroides arundinacea*, *Glyceria maxima*, *Calamagrostis canescens*, *Carex vulpina* и др. В фитоценозах класса *Molinio-Arrhenatheretea* преобладают *Alopecurus pratensis*, *Galium physocarpum*, *Carex praecox*, *Poa angustifolia*, *Agrostis stolonifera*, *Poa palustris*, *Schedonorus pratensis*, *Agrostis vinealis*. Установлено, что доля чужеродных растений в исследуемой ценофлоре составляет 15,5 % (59 видов), которые относятся к 52 родам и 24 семействам. Наиболее многочисленными в видовом отношении являются семейства *Asteraceae* (14 видов), *Poaceae* (5), *Rosaceae* (5) и *Fabaceae* (4 вида). Выявлено 7 инвазионных видов растений, включенных в Черную книгу флоры Беларуси: *Acorus calamus*, *Bidens frondosa*, *Conyza canadensis*, *Echinocystis lobata*, *Oenothera biennis*, *Rumex confertus* и *Xanthium albinum*.

**Ключевые слова:** луговая растительность; пойма р. Днепр; ценофлора; таксономический анализ; система жизненных форм Раункиера; редкие виды растений; инвазионные растения.

## FLORISTIC DIVERSITY OF GRASSLAND VEGETATION OF THE DNEPR RIVER FLOODPLAIN WITHIN THE REPUBLIC OF BELARUS

K. V. DOBYSH<sup>a</sup>, E. Ya. KULIKOVA<sup>a</sup>, G. V. ERMOLENKOVA<sup>a</sup>

V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany, National Academy of Sciences of Belarus,  
27 Akademichnaja Street, Minsk 220072, Belarus

Corresponding author: K. V. Dobysh (8kost@mail.ru)

Based on the processing of 518 geobotanical relevés of Dnieper River floodplain grassland in Belarus, 381 species of vascular plants belonging to 208 genera and 70 families have been identified. Equisetophyta is represented by 4 species, Polypodiophyta by 3 species, Pinophyta by 1 species and Magnoliophyta by 373 species. The top ten families include 228 species, which is more than half of all species of the cenoflora of Dnieper River floodplain grasslands (59,8 %). The studied cenoflora belongs to the *Cyperaceae*-type (Arctoboreal-East Asian) and *Rosaceae*-subtype (conditionally European). The features of the floristic composition of floodplain grasslands depending on the ecological conditions of their formation and mode of use are shown. The volume of the class *Molinio-Arrhenatheretea* cenoflora (329 species) significantly exceeds the volume of the class *Phragmito-Magnocaricetea* cenoflora (210 species), which indicates a significant excess of species richness of dry and mesic meadows over wet and peaty meadows. Changes in the cenotic importance of certain plant species in the floodplain grasslands were revealed. In grasslands of the Dnieper River floodplain, 48 dominant species were recorded, of which grasses accounted for 25 species (52 %), sedges – 12 (25 %), and herbs – 11 species (23 %). The communities of the class *Phragmito-Magnocaricetea* are dominated by *Carex acuta*, *Phalaroides arundinacea*, *Glyceria maxima*, *Calamagrostis canescens*, *Carex vulpina* and others. In phytocoenoses of the class *Molinio-Arrhenatheretea* are dominated by *Alopecurus pratensis*, *Galium physocarpum*, *Carex praecox*, *Poa angustifolia*, *Agrostis stolonifera*, *Poa palustris*, *Schedonorus pratensis*, *Agrostis vinealis*. It was found that the share of alien plants in the studied cenoflora is 15,5% (59 species), which belong to 52 genera and 24 families. The most numerous in terms of species are families *Asteraceae* (14 species), *Poaceae* (5), *Rosaceae* (5) and *Fabaceae* (4 species). 7 invasive plant species from the «Black Book of the Flora of Belarus» were identified: *Acorus calamus*, *Bidens frondosa*, *Conyza canadensis*, *Echinocystis lobata*, *Oenothera biennis*, *Rumex confertus*, *Xanthium albinum*.

**Keywords:** grassland vegetation; floodplain of the Dnieper river; cenoflora; taxonomic analysis; Raunkier's life forms system; rare plant species; invasive plants.

### Введение

Пойменные луга являются не только природными кормовыми угодьями, но и уникальными биотопами для обитания диких животных и произрастания дикорастущих растений, поэтому имеют большое значение для сохранения биологического разнообразия. В настоящее время в лесной зоне наблюдается процесс деградации лугов, приводящий к снижению биологического разнообразия и утрате природных кормовых угодий [1].

Изучение флористического состава луговых фитоценозов способствует решению ряда теоретических и практических задач как в области ботаники и экологии, так и сельского хозяйства. На его основе возможны составление прогнозов изменения пойменных экосистем при разных антропогенных нагрузках,

классификации лугов, типологии кормовых угодий и определении качества корма, организации луговых заказников, воссоздание близких к естественным лугам агрофитоценозов [2].

На флористический состав пойменных лугов влияют два основных природных фактора – аллювиальность и пойменность [2]. Диапазон толерантности видов растений [3] в условиях поймы определяется отношением их к этим факторам. Длительный паводок вызывает уменьшение числа видов в луговых сообществах, отложение более мощного наилка способствует увеличению видового разнообразия [4]. Необходимо отметить, что в луговых экосистемах четко выражена зависимость флористического состава от антропогенной деятельности. Так, при ее отсутствии луга деградируют, для них становится характерно преобладание бурьянистого крупнотравья и зарастание древесно-кустарниковой растительностью. В условиях перевыпаса формируются низкотравные рудеральные сообщества.

Своеобразие флоры проявляется в различных ее чертах и характеризуется разными ее параметрами, среди которых важную роль играют показатели видового богатства, систематической и экологической структуры, состава жизненных форм, помогающие решать целый ряд практических и теоретических вопросов.

Особого внимания заслуживают луга поймы р. Днепр – крупной водной артерии, пересекающей с севера на юг восточную часть Беларуси. Общая протяженность р. Днепр составляет 2 201 км, на территории страны – 700 км [5]. В пределах Беларуси река Днепр пересекает все 3 геоботанические подзоны (дубово-темнохвойных, грабово-дубово-темнохвойных и широколиственно-сосновых лесов), 3 округа (Оршанско-Могилевский, Березинско-Предполесский, Полесско-Приднепровский) и 4 района (Оршанско-Приднепровский, Чечерско-Приднепровский, Гомельско-Приднепровский, Южнополесский) [6]. По особенностям строения долины, русла и условиям протекания р. Днепр выделяют четыре участка: граница России – Могилев, Могилев – Рогачев, Рогачев – Лоев, Лоев – граница Украины [7].

### Материалы и методы исследования

При анализе флористического разнообразия луговой растительности поймы р. Днепр было использовано 518 геоботанических описаний, выполненных авторами в течение нескольких полевых сезонов (2015, 2018, 2022 и 2023 гг.) на пробной площади размером 10×10 м стандартным геоботаническим методом [8]. Полевые исследования проводились в Могилевском, Быховском р-нах Могилевской обл. и Рогачевском, Жлобинском, Буда-Кошелевском, Речицком, Гомельском, Лоевском и Брагинском р-нах Гомельской обл. Беларуси маршрутно-рекогносцировочным методом (рис. 1).

Все геоботанические описания были объединены в базу данных с использованием программы *TURBOVEG 2* [9]. При таксономическом анализе ценофлоры луговой растительности использовался справочник Н. Н. Цвелева [10], латинские названия растений приведены согласно электронного ресурса «Royal Botanic Gardens, Kew» (Plants of the World Online) [11].

Классификация луговой растительности выполнена эколого-флористическим методом Ж. Браун-Бланке [12]. Название синтаксонов высших рангов (класс, порядок, союз) приведены по сводке L. Mucina с соавторами [13]. Анализ жизненных форм растений выполнен по К. Раункиеру с использованием базы данных растительности, местообитаний и флоры Европы (Database of European Vegetation, Habitats and Flora) [14; 15]. При составлении списка адвентивных видов растений и их характеристики (время и способ заноса, степень натурализации) использовались работы В. И. Парфенова, Д. И. Третьякова, Д. В. Дубовика, А. Н. Мялика и др. [16–22].

### Результаты исследования и их обсуждение

Общий флористический список сосудистых растений луговых сообществ поймы реки Днепр включает 381 вид, относящихся к 208 родам, 70 семействам, 35 порядкам, 5 классам и 4 отделам. Сосудистая флора лугов Беларуси насчитывает 750 видов [23], а сосудистая флора восточной части страны – 1 997 видов [24]. Исходя из этого, исследуемая ценофлора составляет 51 % луговой флоры страны и 19 % флоры ее восточной части соответственно.

Отдел хвощеобразные (Equisetophyta) представлен 4 видами, папоротникообразные (Polypodiophyta) – 3 видами, голосеменные (Pinophyta) – 1 видом и покрытосеменные (Magnoliophyta) – 373 видами.

Десять ведущих семейств включают 228 видов, что составляет больше половины всех видов ценофлоры луговой растительности р. Днепр (59,8 %). Первые три места в систематическом спектре исследуемой ценофлоры, как и во флоре Беларуси [25], занимают семейства *Poaceae* Barnh., *Asteraceae* Bercht. & J. Presl и *Cyperaceae* Juss. К числу ведущих семейств также относятся *Rosaceae* Juss., *Fabaceae* Lindl., *Scrophulariaceae* Juss., *Caryophyllaceae* Juss., *Lamiaceae* Martinov, *Polygonaceae* Juss. и *Salicaceae* Mirb. (рис. 2.). Таким образом, исследуемая ценофлора относится к *Cyperaceae*-типу (арктобореально-восточноазиатскому) и *Rosaceae*-подтипу (условно-европейскому) [26]. Ниже 10-го места располагаются семейства *Ranunculaceae* Juss. (11 видов, 4 рода), *Apiaceae* Lindl. (11 видов, 10 родов), *Brassicaceae* Burnett (10 видов, 7 рода) и *Rubiaceae* Juss. (11 видов, 1 род). Около 29 % семейств имеют по 6 видов, из них 28 семейств (7,3 %) содержат по одному виду.



Рис. 1. Район исследований: ● – местонахождения геоботанических описаний

Fig. 1. Study area: ● – localities of relevés

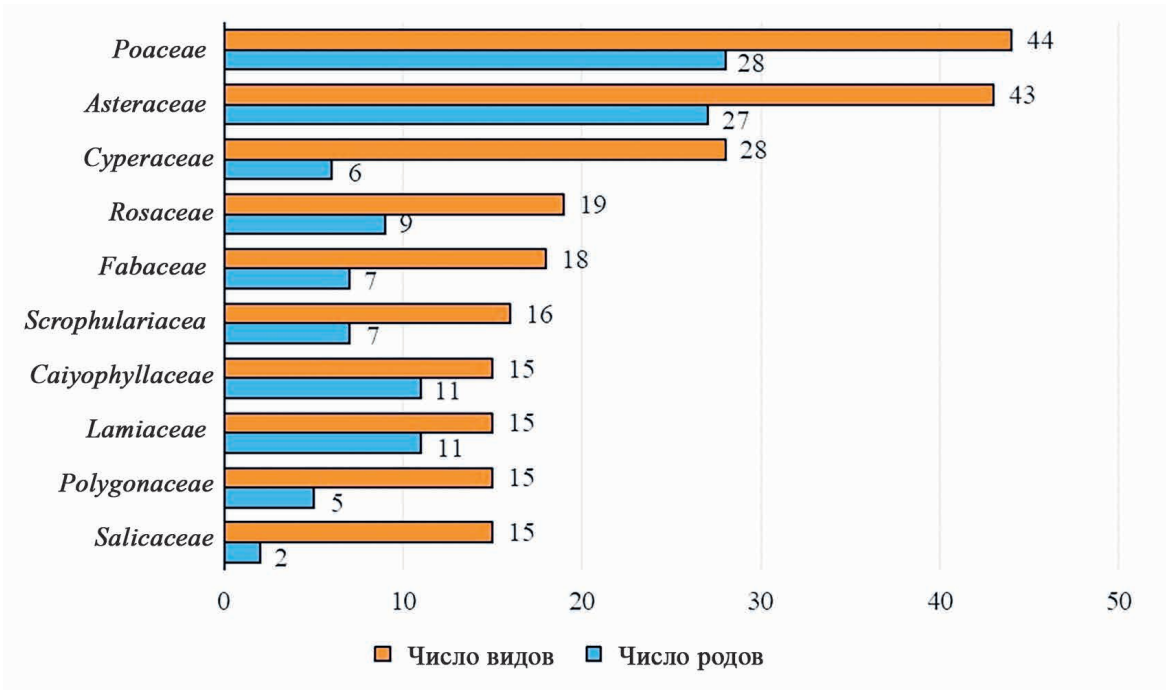


Рис. 2. Число видов и родов в 10 ведущих семействах ценофлоры луговой растительности поймы р. Днепр

Fig. 2. The number of species and genera in the 10 leading families of the cenoflora of the grassland vegetation of the Dnieper River floodplain

В списке ведущих родов исследуемой ценофлоры – *Carex* (21 вид), *Salix* (12), *Galium* (9), *Rumex* (8), *Veronica* (8), *Trifolium* (7) и *Ranunculus* (6 видов).

В пойменных луговых сообществах р. Днепр встречаются виды редких и находящихся под угрозой исчезновения дикорастущих растений Республики Беларусь: *Iris sibirica* L. – IV категория охраны (NT), *Galatella rossica* Новороск. – I категория охраны (EN), *Salvinia natans* (L.) All. – IV категория охраны (NT), а также виды растений, нуждающихся в профилактической охране: *Bistorta major* Gray, *Dactylorhiza baltica* (Klinge) N. I. Orlova, *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soó, *Gentiana pneumonanthe* L., *Lotus uliginosus* Schkuhr.

Изученные луговые сообщества отнесены к 2 классам растительности *Phragmito-Magnocaricetea* Klika in Klika et Novák 1941 (болотистые и торфянистые луга низкого уровня поймы) и *Molinio-Arrhenatheretea* Tüxen 1937 (остепненные, настоящие и сырые луга среднего и высокого уровней поймы). Количество выполненных геоботанических описаний и их распределение по высшим синтаксонам луговой растительности поймы р. Днепр представлен в табл. 1.

Таблица 1

Распределение количества выполненных геоботанических описаний по высшим синтаксонам растительности

Table 1

Distribution of the number of geobotanical relevés by higher vegetation syntaxons

| Класс растительности                           | Союз                                                                                                                                                                 | Количество описаний |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <i>Phragmito-Magnocaricetea</i> (236 описаний) | <i>Magnocaricion gracilis</i> Gehu 1961 (осоковые и крупнотравяные болотные сообщества на эвтрофных глинистых отложениях)                                            | 181                 |
|                                                | <i>Phragmition communis</i> Koch 1926 (земноводные травяные сообщества мезотрофных и эвтрофных водоемов и водотоков)                                                 | 38                  |
|                                                | <i>Eleocharito palustris-Sagittarion sagittifoliae</i> Passarge 1964 (травяные сообщества геломорфных и гигрофильных видов на мелководьях с колебаниями уровня воды) | 14                  |
|                                                | <i>Glycerio-Sparganion</i> Br.-Bl. et Sissingh in Boer 1942 (травяные сообщества небольших пресноводных ручьев и мелководных водоемов)                               | 3                   |
| <i>Molinio-Arrhenatheretea</i> (282 описания)  | <i>Filipendulion ulmariae</i> Segal ex Westhoff et Den Held 1969 (сырые разнотравные луга).                                                                          | 2                   |
|                                                | <i>Deschampsion cespitosae</i> Horvatic 1930 (влажные разнотравно-злаковые луга)                                                                                     | 174                 |
|                                                | <i>Molinion caeruleae</i> Koch 1926 (разнотравно-злаковые луга на временно влажных почвах сенокосного использования)                                                 | 9                   |
|                                                | <i>Arrhenatherion elatioris</i> Luquet 1926 (мезофитные мелкотравно-злаковые луга сенокосного использования)                                                         | 22                  |
|                                                | <i>Agrostion vinealis</i> Sipailova (ксеромезофитные мелкотравно-злаковые луга)                                                                                      | 70                  |
|                                                | <i>Potentillion anserinae</i> Tx. 1947 (временно избыточно увлажненные и интенсивно выпасаемые разнотравно-злаковые луга)                                            | 5                   |
| Всего                                          |                                                                                                                                                                      | 518                 |

Объем ценофлоры класса *Molinio-Arrhenatheretea* (329 видов) значительно превышает объем ценофлоры класса *Phragmito-Magnocaricetea* (210 видов). Это можно объяснить тем, что для фитоценозов класса *Molinio-Arrhenatheretea* характерно многообразие пойменных местообитаний, обусловленное своеобразием геоморфологического строения поймы, гидрологической и рельефообразующей динамичностью. Соотношения видового, родового и семейственного богатства флоры, выраженные средним числом видов в роде (в/р) и в семействе (в/с), а также средним числом родов в семействе (р/с) являются показателями систематической структуры флоры [27]. Объем ценофлор высших синтаксонов луговой растительности поймы р. Днепр показан в табл. 2.

Класс *Phragmito-Magnocaricetea* представлен 210 видами, 123 родами, 53 семействами. В данном классе наиболее многочисленными в видовом отношении являются семейства: *Poaceae* (24 видов); *Cyperaceae* (18 видов); *Asteraceae* (17 видов); *Salicaceae* (12 видов); *Polygonaceae* (11 видов). Наиболее распространенными видами класса являются: *Carex acuta* L., *Phalaroides arundinacea* (L.) Rausch., *Lysimachia vulgaris* L., *Carex vulpina* L., *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb., *Potamogeton amplifolius* (L.) Ledeb. ex Reichenb.) Ledeb., *Ranunculus repens* L., *Stachys palustris* L. Наибольшее число видов выявлено в луговых фитоценозах союзов: *Magnocaricion gracilis* (176 видов, 102 родов, 46 семейств) и *Phragmition communis* (95 видов, 68 родов, 41 семейств). Среднее видовое богатство сообществ данного класса составляет – 11,3 (1 – 35) вида, средняя величина индекса разнообразия Шеннона – 1,3.

Таблица 2

Объем ценофлор высших синтаксонов луговой растительности поймы р. Днепр в пределах Беларуси

Table 2

The volume of cenoflora of higher syntaxons of Dnieper River floodplain grassland vegetation of Belarus

| Синтаксон                                                   | Число |       |          | Среднее<br>число видов<br>в семействе | Среднее число<br>видов в роде | Среднее<br>число родов<br>в семействе |
|-------------------------------------------------------------|-------|-------|----------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
|                                                             | видов | родов | семейств |                                       |                               |                                       |
| Класс <i>PHRAGMITO-MAGNOCARICETEA</i>                       | 210   | 123   | 53       | 3,94                                  | 1,7                           | 2,32                                  |
| Союз <i>Magnocaricion gracilis</i>                          | 176   | 102   | 46       | 3,83                                  | 1,73                          | 2,22                                  |
| Союз <i>Phragmition communis</i>                            | 95    | 68    | 41       | 2,32                                  | 1,4                           | 1,66                                  |
| Союз <i>Eleocharito palustris-Sagittarion sagittifoliae</i> | 77    | 53    | 31       | 2,48                                  | 1,45                          | 1,74                                  |
| Союз <i>Glycerio-Sparganion</i>                             | 43    | 37    | 23       | 1,87                                  | 1,16                          | 1,61                                  |
| Класс <i>MOLINIO-ARRHENATHERETEA</i>                        | 329   | 183   | 57       | 5,77                                  | 1,8                           | 3,21                                  |
| Союз <i>Filipendulion ulmariae</i>                          | 30    | 23    | 14       | 2,14                                  | 1,3                           | 1,64                                  |
| Союз <i>Deschampsion cespitosae</i>                         | 222   | 126   | 45       | 4,93                                  | 1,76                          | 2,8                                   |
| Союз <i>Molinion caeruleae</i>                              | 75    | 55    | 27       | 2,78                                  | 1,36                          | 2,45                                  |
| Союз <i>Arrhenatherion elatioris</i>                        | 144   | 87    | 31       | 4,65                                  | 1,66                          | 4,35                                  |
| Союз <i>Agrostion vinealis</i>                              | 212   | 131   | 45       | 4,71                                  | 1,61                          | 2,93                                  |
| Союз <i>Potentillion anserinae</i>                          | 102   | 66    | 28       | 3,64                                  | 1,55                          | 2,36                                  |
| Ценофлора в общем                                           | 381   | 208   | 70       | 5,44                                  | 1,83                          | 2,97                                  |

Класс *Molinio-Arrhenatheretea* представлен 329 видами, 183 родами, 57 семействами. В этом классе наиболее многочисленными в видовом отношении являются семейства: *Poaceae* (44 видов); *Asteraceae* (42 видов); *Cyperaceae* (21 видов); *Fabaceae* (18 видов); *Rosaceae* (17 видов). Наиболее распространенными видами класса являются: *Alopecurus pratensis* L., *Carex praecox* Schreb., *Galium physocarpum* Ledeb., *Carex vulpina*, *Poa palustris* L., *Veronica longifolia* L., *Vicia cracca* L., *Poa angustifolia* L., *Kadenia dubia* (Schkuhr) Lavrova & V. N. Tikhom., *Ptarmica cartilaginea*, *Coronaria flos-cuculi* (L.) A. Braun, *Elytrigia repens* (L.) Nevski. Наибольшее число видов выявлено в луговых сообществах союзов: *Deschampsion cespitosae* (222 видов, 126 родов, 45 семейств), *Agrostion vinealis* (211 видов, 131 родов, 45 семейств) и *Arrhenatherion elatioris* (144 видов, 87 родов, 31 семейств). Сообщества класса *Molinio-Arrhenatheretea* отличаются более высоким видовым богатством и разнообразием по сравнению с сообществами класса *Phragmito-Magnocaricetea* (табл. 3).

Таблица 3

Видовое богатство и индекс разнообразия Шеннона луговой растительности поймы р. Днепр

Table 3

The number of species and the Shannon diversity index of Dnieper river floodplain grassland

| Синтаксон                                                   | Видовое богатство |             |              | Индекс разнообразия Шеннона |             |              |
|-------------------------------------------------------------|-------------------|-------------|--------------|-----------------------------|-------------|--------------|
|                                                             | среднее           | минимальное | максимальное | среднее                     | минимальное | максимальное |
| <i>PHRAGMITO-MAGNOCARICETEA</i>                             | 11,3              | 1           | 35           | 1,30                        | 0           | 2,68         |
| Союз <i>Magnocaricion gracilis</i>                          | 11,4              | 1           | 35           | 1,30                        | 0           | 2,68         |
| Союз <i>Phragmition communis</i>                            | 10,0              | 4           | 21           | 1,17                        | 0,28        | 2,02         |
| Союз <i>Eleocharito palustris-Sagittarion sagittifoliae</i> | 12,5              | 3           | 21           | 1,66                        | 0,43        | 2,17         |
| Союз <i>Glycerio-Sparganion</i>                             | 18,7              | 12          | 27           | 1,59                        | 1,07        | 2,52         |
| <i>MOLINIO-ARRHENATHERETEA</i>                              | 18,7              | 3           | 42           | 1,96                        | 0,56        | 3,22         |
| Союз <i>Filipendulion ulmariae</i>                          | 18                | 10          | 26           | 1,76                        | 1,13        | 2,39         |
| Союз <i>Deschampsion cespitosae</i>                         | 19,1              | 4           | 42           | 2,04                        | 1,07        | 3,22         |
| Союз <i>Molinion caeruleae</i>                              | 22,1              | 17          | 32           | 2,2                         | 1,6         | 2,95         |

Окончание табл. 3

Ending table 3

| Синтаксон                            | Видовое богатство |             |              | Индекс разнообразия Шеннона |             |              |
|--------------------------------------|-------------------|-------------|--------------|-----------------------------|-------------|--------------|
|                                      | среднее           | минимальное | максимальное | среднее                     | минимальное | максимальное |
| Союз <i>Arrhenatherion elatioris</i> | 21,5              | 3           | 36           | 2,06                        | 0,56        | 3,05         |
| Союз <i>Agrostion vinealis</i>       | 16,4              | 3           | 31           | 1,78                        | 0,62        | 2,63         |
| Союз <i>Potentillion anserinae</i>   | 18,2              | 9           | 33           | 1,65                        | 0,87        | 2,77         |

Биоморфологический анализ жизненных форм растений показал закономерное преобладание гемикриптофитов (более 60 %) в видовом составе союзов луговой растительности (рис. 3). Наибольшая доля криптофитов в спектре ценофлор класса *Phragmito-Magnocaricetea* и варьирует от 8 % (союз *Magnocaricion gracilis*) до 18 % (союз *Phragmition communis*).

Наибольшее видовое разнообразие фанерофитов характерно для сообществ союзов *Magnocaricion gracilis*, *Deschampsion cespitosae* и *Agrostion vinealis*. Закустаривание луговых фитоценозов поймы р. Днепр происходит преимущественно кустарниковыми ивами: *Salix cinerea*, *S. triandra*, *S. acutifolia*. Следует отметить приуроченность *Salix rosmarinifolia* к сообществам союза *Molinion caeruleae*. Из деревьев на пойменных лугах исследуемого региона чаще всего встречаются *Pyrus communis*, *Quercus robur*, *Salix alba*, *S. euxina*, *Malus sylvestris*, *Frangula alnus*.

Наибольшая доля терофитов (11,6 %) выявлена во флористическом составе союзов *Glycerio-Sparganion*, *Deschampsion cespitosae*, *Agrostion vinealis*. Терофитами с наибольшей константностью являются *Bidens frondosa*, *Echinocystis lobata*, *Persicaria hydropiper*, *Bromus mollis*, *Xanthium albinum*, *Conyza canadensis*.

В составе исследуемой ценофлоры доля хамефитов невелика, наибольшее их количество отмечено в союзе *Agrostion vinealis*. Это *Genista tinctoria*, *Cerastium holosteoides*, *Artemisia campestris*, *Sedum acre*, *S. sexangulare*, *Artemisia absinthium*.

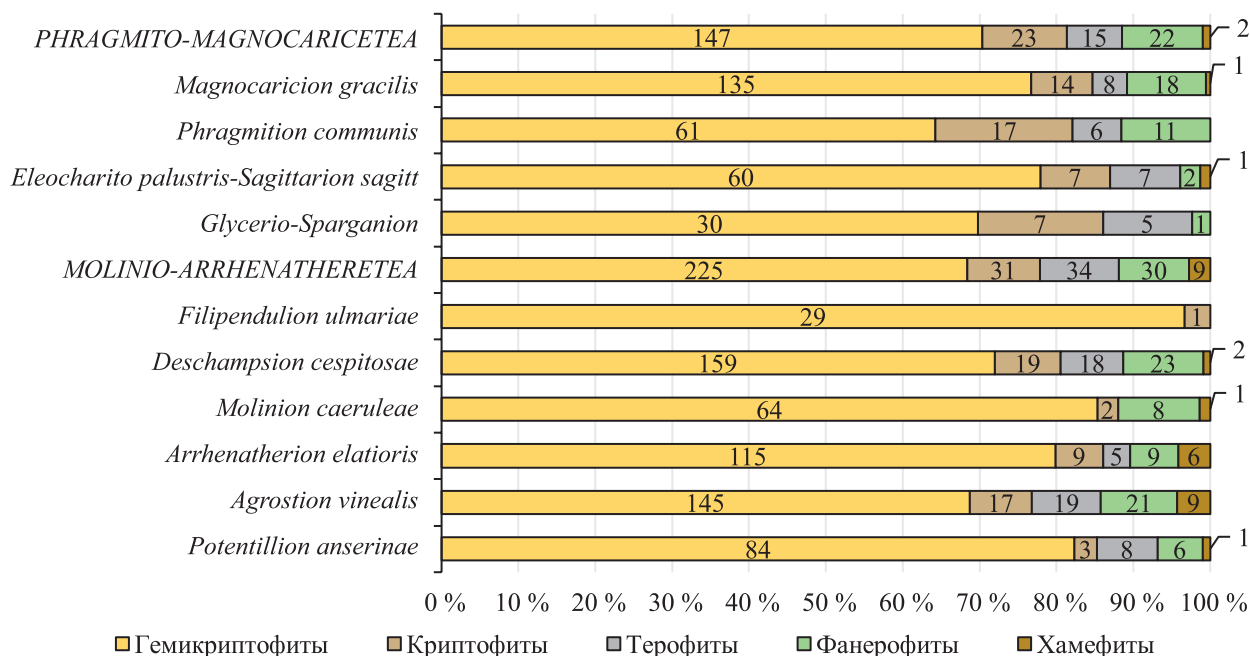


Рис. 3. Структура жизненных форм высших синтаксонов луговой растительности поймы р. Днепр

Fig. 3. The structure of life forms of higher syntaxons of Dnieper river floodplain grassland

В луговых фитоценозах поймы р. Днепр отмечено 48 доминантных видов, из которых злаки составляют 25 видов (52 %), осоки – 12 (25 %), разнотравье – 11 видов (23 %) (табл. 4). В сообществах класса *Phragmito-Magnocaricetea* доминируют *Carex acuta*, *Phalaroides arundinacea*, *Glyceria maxima*, *Calamagrostis canescens* (Weber) Roth, *Carex vulpina* и др. В фитоценозах класса *Molinio-Arrhenatheretea* преобладают *Alopecurus pratensis*, *Galium physocarpum*, *Carex praecox*, *Poa angustifolia*, *Agrostis stolonifera* L., *Poa palustris*, *Schedonorus pratensis* (Huds.) P. Beauv., *Agrostis vinealis* Schreb.

Таблица 4

Частота доминирования и встречаемость видов сосудистых растений в сообществах классов  
*Phragmito-Magnocaricetea* и *Molinio-Arrhenatheretea* поймы р. Днепр (%)

Table 4

Frequency of dominance and occurrence of vascular plant species in communities of classes  
*Phragmito-Magnocaricetea* and *Molinio-Arrhenatheretea* in the Dnieper River floodplain (%)

| Вид                            | Дом. % | Phragmito-Magnocaricetea |       |           |       |                         |       |           |       | Molinio-Arrhenatheretea |       |           |       |            |       |            |       |           |       |           |       |     |
|--------------------------------|--------|--------------------------|-------|-----------|-------|-------------------------|-------|-----------|-------|-------------------------|-------|-----------|-------|------------|-------|------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----|
|                                |        | Magn. grac.              |       | Glyc.-Sp. |       | Eleochn. pal.-Sag. sag. |       | Phr. com. |       | Fil. ulm.               |       | Des. ces. |       | Mol. caer. |       | Arr. elat. |       | Agr. vin. |       | Pot. ans. |       |     |
|                                |        | дом.                     | встр. | дом.      | встр. | дом.                    | встр. | дом.      | встр. | дом.                    | встр. | дом.      | встр. | дом.       | встр. | дом.       | встр. | дом.      | встр. | дом.      | встр. |     |
|                                |        |                          |       |           |       |                         |       |           |       |                         |       |           |       |            |       |            |       |           |       |           |       |     |
| <i>Alopecurus pratensis</i>    | 15,8   | –                        | 7,3   | –         | –     | –                       | –     | 0,2       | встр. | дом.                    | –     | 0,2       | 15,6  | 30,8       | –     | 1,1        | –     | 2,1       | 0,2   | 4,5       | –     | 0,8 |
| <i>Carex acuta</i>             | 12,8   | 12,8                     | 26,6  | –         | 0,2   | –                       | 1,5   | –         | 5,4   | –                       | 0,4   | –         | 5,1   | –          | –     | –          | –     | –         | –     | 0,4       | –     | 1,3 |
| <i>Phalaroides arundinacea</i> | 12,8   | 12,8                     | 24,2  | –         | –     | –                       | 0,4   | –         | 2,8   | –                       | –     | –         | –     | 13,9       | –     | –          | –     | 0,8       | –     | 0,8       | –     | 2,4 |
| <i>Galium physocarpum</i>      | 9,0    | –                        | 5,3   | –         | –     | –                       | 0,2   | –         | –     | –                       | 0,2   | 9,0       | 24,4  | –          | 1,7   | –          | 0,8   | –         | 3,2   | –         | 0,4   |     |
| <i>Glyceria maxima</i>         | 6,4    | 1,3                      | 10,9  | –         | 0,4   | –                       | 0,9   | 5,1       | 5,4   | –                       | –     | –         | 0,4   | –          | –     | –          | –     | –         | –     | –         | –     | 1,9 |
| <i>Carex praecox</i>           | 5,4    | –                        | 1,3   | –         | –     | –                       | 0,4   | –         | –     | –                       | –     | 0,4       | 21,0  | –          | 1,1   | –          | 0,2   | 5,0       | 10,3  | –         | 0,2   |     |
| <i>Poa angustifolia</i>        | 3,0    | –                        | 0,2   | –         | –     | –                       | –     | –         | –     | –                       | –     | –         | 6,6   | –          | 0,4   | –          | 1,3   | 3,0       | 10,9  | –         | 0,2   |     |
| <i>Agrostis stolonifera</i>    | 2,8    | –                        | 0,9   | –         | 0,2   | –                       | 1,3   | –         | 1,1   | –                       | –     | –         | 0,4   | –          | –     | –          | –     | –         | –     | –         | 2,8   | 3,0 |
| <i>Poa palustris</i>           | 2,7    | –                        | 6,2   | –         | 0,2   | –                       | 0,2   | –         | –     | –                       | –     | 2,3       | 18,8  | –          | 0,9   | –          | 0,4   | –         | 1,1   | 0,4       | 1,1   |     |
| <i>Calamagrostis canescens</i> | 2,6    | 2,6                      | 4,7   | –         | –     | –                       | –     | –         | –     | –                       | 0,2   | –         | 1,7   | –          | 0,2   | –          | –     | –         | 0,4   | –         | –     |     |
| <i>Calamagrostis epigeios</i>  | 2,1    | –                        | 0,4   | –         | –     | –                       | –     | –         | –     | –                       | –     | –         | 1,5   | –          | –     | –          | 0,2   | 2,1       | 7,1   | –         | –     |     |
| <i>Schedonorus pratensis</i>   | 2,1    | –                        | 0,2   | –         | –     | –                       | –     | –         | –     | –                       | –     | –         | 3,6   | –          | –     | 2,1        | 2,8   | –         | 0,6   | –         | 0,2   |     |
| <i>Agrostis vinealis</i>       | 1,9    | –                        | –     | –         | –     | –                       | –     | –         | –     | –                       | –     | –         | 1,9   | –          | 0,2   | –          | –     | 1,9       | 5,3   | –         | –     |     |
| <i>Elytrigia repens</i>        | 1,9    | –                        | 1,3   | –         | –     | –                       | 0,2   | –         | 0,2   | –                       | –     | 1,9       | 11,1  | –          | –     | –          | 1,1   | –         | 3,6   | –         | 0,9   |     |
| <i>Carex vulpina</i>           | 1,7    | 1,7                      | 16,3  | –         | 0,2   | –                       | 1,5   | –         | 1,1   | –                       | 0,19  | –         | 20,6  | –          | 0,6   | –          | 0,6   | –         | 1,1   | –         | 2,3   |     |
| <i>Molinia caerulea</i>        | 1,7    | –                        | –     | –         | –     | –                       | –     | –         | –     | –                       | –     | –         | 1,1   | 1,7        | 1,7   | –          | –     | –         | 0,2   | –         | –     |     |
| <i>Phragmites australis</i>    | 1,7    | –                        | 1,1   | –         | –     | –                       | –     | 1,7       | 1,7   | –                       | –     | –         | 0,2   | –          | –     | –          | –     | –         | –     | –         | –     |     |
| <i>Poa pratensis</i>           | 1,3    | –                        | 0,4   | –         | –     | –                       | –     | –         | –     | –                       | –     | 0,4       | 6,6   | –          | 0,4   | 0,9        | 2,6   | –         | 0,4   | –         | 0,6   |     |
| <i>Bromopsis inermis</i>       | 1,1    | –                        | 1,5   | –         | –     | –                       | –     | –         | –     | –                       | –     | 1,1       | 6,8   | –          | –     | –          | 0,4   | –         | 1,1   | –         | 0,4   |     |

Продолжение табл. 4

Continue table 4

| Вид                         | Дом. % | Phragmito-Magnocaricetea |       |           |       |                          |       |           |       |           |       | Molinio-Arrhenatheretea |       |            |       |            |       |           |       |           |       |
|-----------------------------|--------|--------------------------|-------|-----------|-------|--------------------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-------------------------|-------|------------|-------|------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|                             |        | Magn. grac.              |       | Glyc.-Sp. |       | Eleochar. pal.-Sag. sag. |       | Phr. com. |       | Fil. ulm. |       | Des. ces.               |       | Mol. caer. |       | Arr. elat. |       | Agr. vin. |       | Pot. ans. |       |
|                             |        | дом.                     | встр. | дом.      | встр. | дом.                     | встр. | дом.      | встр. | дом.      | встр. | дом.                    | встр. | дом.       | встр. | дом.       | встр. | дом.      | встр. | дом.      | встр. |
| <i>Carex riparia</i>        | 1,1    | 1,1                      | 1,3   | –         | –     | –                        | –     | –         | 0,4   | –         | –     | –                       | –     | –          | –     | –          | –     | –         | –     | –         | –     |
| <i>Eleocharis palustris</i> | 0,9    | –                        | 3,6   | –         | 0,2   | 0,9                      | 1,3   | –         | 1,3   | –         | 0,19  | –                       | 2,8   | –          | –     | –          | –     | –         | –     | 2,3       | –     |
| <i>Carex cespitosa</i>      | 0,8    | –                        | 1,3   | –         | –     | –                        | –     | –         | 0,2   | –         | –     | 0,8                     | 8,8   | –          | 0,2   | –          | 0,2   | –         | –     | –         | –     |
| <i>Carex vesicaria</i>      | 0,8    | 0,8                      | 7,5   | –         | 0,4   | –                        | 0,2   | –         | 1,7   | –         | –     | –                       | 0,2   | –          | –     | –          | –     | –         | –     | 0,2       | –     |
| <i>Rorippa amphibia</i>     | 0,8    | –                        | 4,3   | –         | 0,2   | 0,8                      | 1,3   | –         | 3,4   | –         | –     | –                       | 0,4   | –          | –     | –          | –     | –         | –     | 1,7       | –     |
| <i>Agrostis gigantea</i>    | 0,6    | –                        | 0,2   | –         | –     | –                        | –     | –         | –     | –         | –     | 0,2                     | 1,3   | –          | 0,2   | 0,4        | 0,4   | –         | 0,4   | –         | 0,4   |
| <i>Festuca rubra</i>        | 0,6    | –                        | –     | –         | –     | –                        | –     | –         | –     | –         | –     | –                       | 0,6   | –          | 0,2   | 0,6        | 1,9   | –         | 2,1   | –         | –     |
| <i>Ranunculus repens</i>    | 0,6    | –                        | 11,3  | –         | –     | –                        | 1,1   | –         | 1,1   | –         | 0,19  | –                       | 10,3  | –          | 0,4   | –          | 0,9   | –         | 0,2   | 0,6       | 2,4   |
| <i>Sparganium erectum</i>   | 0,6    | –                        | 0,6   | –         | –     | 0,6                      | 0,6   | –         | 0,4   | –         | –     | –                       | –     | –          | –     | –          | –     | –         | –     | –         | –     |
| <i>Bromus mollis</i>        | 0,4    | –                        | –     | –         | –     | –                        | –     | –         | –     | –         | –     | –                       | 0,4   | –          | –     | 0,6        | 0,4   | 0,6       | –     | –         | –     |
| <i>Carex hartmanii</i>      | 0,4    | 0,4                      | 0,4   | –         | –     | –                        | –     | –         | –     | –         | –     | –                       | 0,2   | –          | 0,2   | –          | –     | –         | –     | –         | –     |
| <i>Filipendula ulmaria</i>  | 0,4    | –                        | 3,0   | –         | –     | –                        | –     | –         | 0,2   | 0,4       | 0,4   | –                       | 11,6  | –          | –     | –          | 0,6   | –         | 0,2   | –         | –     |
| <i>Iris sibirica</i>        | 0,4    | 0,2                      | 1,7   | –         | –     | –                        | 0,4   | –         | –     | –         | –     | 0,2                     | 12,4  | –          | –     | –          | –     | 0,8       | –     | –         | –     |
| <i>Leersia oryzoides</i>    | 0,4    | –                        | 0,2   | 0,4       | 0,4   | –                        | –     | –         | –     | –         | –     | –                       | –     | –          | –     | –          | –     | –         | –     | 0,2       | –     |
| <i>Poa trivialis</i>        | 0,4    | –                        | 0,4   | –         | –     | –                        | –     | –         | –     | –         | –     | 0,4                     | 2,1   | –          | –     | –          | –     | –         | –     | –         | –     |

Окончание табл. 4  
Ending table 4

| Вид                             | Дом. % | Phragmito-Magnocaricetea |       |           |       |                          |       |           |       |           |       | Molinio-Arrhenatheretea |       |            |       |            |       |           |       |           |       |
|---------------------------------|--------|--------------------------|-------|-----------|-------|--------------------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-------------------------|-------|------------|-------|------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
|                                 |        | Magn. grac.              |       | Glyc.-Sp. |       | Eleochar. pal.-Sag. sag. |       | Phr. com. |       | Fil. ulm. |       | Des. ces.               |       | Mol. caer. |       | Arr. elat. |       | Agr. vin. |       | Pot. ans. |       |
|                                 |        | дом.                     | встр. | дом.      | встр. | дом.                     | встр. | дом.      | встр. | дом.      | встр. | дом.                    | встр. | дом.       | встр. | дом.       | встр. | дом.      | встр. | дом.      | встр. |
| <i>Acorus calamus</i>           | 0,2    | –                        | 1,3   | –         | 0,2   | –                        | 0,2   | 0,2       | 0,2   | –         | –     | –                       | –     | –          | –     | –          | –     | –         | –     | –         | –     |
| <i>Alisma plantago-aquatica</i> | 0,2    | –                        | 5,1   | –         | 0,4   | 0,2                      | 1,1   | –         | 2,6   | –         | –     | –                       | 0,4   | –          | –     | –          | –     | –         | –     | –         | 1,7   |
| <i>Anthoxanthum odoratum</i>    | 0,2    | –                        | –     | –         | –     | –                        | –     | –         | –     | –         | –     | –                       | 0,6   | –          | 0,2   | 1,3        | –     | 0,4       | –     | –         | –     |
| <i>Aristolochia clematitis</i>  | 0,2    | –                        | –     | –         | –     | –                        | –     | –         | –     | –         | –     | –                       | –     | –          | –     | –          | 0,2   | 0,4       | –     | –         | –     |
| <i>Butomus umbellatus</i>       | 0,2    | –                        | 1,9   | –         | –     | 0,2                      | 0,6   | –         | 1,3   | –         | –     | –                       | 0,6   | –          | –     | –          | –     | –         | –     | –         | 1,1   |
| <i>Carex caryophyllaea</i>      | 0,2    | –                        | –     | –         | –     | –                        | –     | –         | –     | –         | –     | –                       | –     | –          | –     | –          | 0,2   | 0,2       | –     | –         | –     |
| <i>Carex omskiana</i>           | 0,2    | 0,2                      | 0,2   | –         | –     | –                        | –     | –         | –     | –         | –     | –                       | –     | –          | –     | –          | –     | –         | –     | –         | –     |
| <i>Carex rostrata</i>           | 0,2    | 0,2                      | 0,2   | –         | –     | –                        | –     | –         | –     | –         | –     | –                       | –     | –          | –     | –          | –     | –         | –     | –         | –     |
| <i>Galium verum</i>             | 0,2    | –                        | –     | –         | –     | –                        | –     | –         | –     | –         | –     | –                       | 3,6   | –          | 0,8   | –          | 0,2   | 0,2       | 6,9   | –         | –     |
| <i>Glyceria fluitans</i>        | 0,2    | –                        | 1,1   | 0,2       | 0,4   | –                        | 0,4   | –         | 0,4   | –         | –     | –                       | 0,2   | –          | –     | 0,2        | –     | –         | –     | –         | 1,5   |
| <i>Gratiola officinalis</i>     | 0,2    | –                        | 1,9   | –         | –     | –                        | 0,2   | –         | –     | –         | 0,19  | 0,2                     | 6,2   | –          | 0,4   | –          | –     | –         | 2,1   | –         | 0,8   |
| <i>Holcus lanatus</i>           | 0,2    | –                        | 0,2   | –         | –     | –                        | –     | –         | –     | –         | –     | 0,2                     | 0,2   | –          | –     | –          | –     | –         | –     | –         | –     |
| <i>Juncus atratus</i>           | 0,2    | –                        | 0,4   | –         | –     | –                        | 0,2   | –         | –     | –         | –     | 0,2                     | 2,1   | –          | 0,4   | –          | –     | 0,2       | –     | –         | –     |
| <i>Typha latifolia</i>          | 0,2    | –                        | –     | –         | –     | –                        | –     | 0,2       | 0,6   | –         | –     | –                       | –     | –          | –     | –          | –     | –         | –     | –         | –     |

Примечание. Союзы: Magn. grac. – Magnocaricion gracilis, Glyc.-Sp. – Glycerio-Sparganion, Eleoch. pal.-Sagitt. sag. – Eleocharito palustris-Sagittarion sagittifoliae, Phrag. com. – Phragmiton communis, Fil. ulm. – Filipendulion ulmariae, Des. ces. – Deschampsion cespitosae, Mol. caer. – Molinion caeruleae, Arr. elat. – Arrhenatherion elatioris, Agr. vin. – Agrostion vinealis, Pot. ans. – Potentillion anserinae.

Анализ чужеродной фракции флористического состава луговых сообществ поймы р. Днепр выявил 59 адвентивных видов сосудистых растений, которые составляют 15,5 % от исследуемой ценофлоры. Данные виды растений относятся к 52 родам и 24 семействам. Наиболее многочисленными в видовом отношении являются семейства *Asteraceae* (14 видов), *Poaceae* (5), *Rosaceae* (5) и *Fabaceae* (4 вида).

Среди чужеродных растений выявлено 7 инвазионных, включенных в Черную книгу флоры Беларуси, *Acorus calamus* L., *Bidens frondosa* L., *Conyza canadensis* (L.) Cronquist, *Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. & A. Gray, *Oenothera biennis* L., *Rumex confertus* Willd. и *Xanthium albinum* H. Scholz.

Высокой степенью константности в луговых сообществах отличаются *Cirsium arvense* (L.) Scop., *Rumex confertus* Willd., *Pyrus communis* L., *Bidens frondosa* L., *Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. et Gray, *Salix euxina* I. V. Belyaeva, *Acorus calamus* L., *Malus domestica* Borkh., *Phalacrologium annuum* (L.) Dumort., *Tanacetum vulgare* L., *Berteroa incana* (L.) DC., *Bromus mollis* L., *Conyza canadensis* (L.) Cronquist, *Xanthium albinum* (Widder) Scholz & Sukopp.

По наибольшему количеству адвентивных видов лидирует ценофлора класса *Molinio-Arrhenatheretea* (276 видов), при этом ведущими являются сообщества союзов *Deschampsion cespitosae* (33 вида), *Agrostion vinealis* (29 видов), *Arrhenatherion elatioris* (22 вида) (табл. 5). Внедрение адвентивных видов растений в данные фитоценозы часто связаны с нарушением почвенного покрова крупным рогатым скотом, сельскохозяйственной техникой, а также дикими животными. Также инвазиям подвержены остепненные луга на аллювиальных дерновых песчаных почвах с разреженным травостоем и низкой ценотической замкнутостью.

Частота встречаемости адвентивных видов во флористическом составе класса *Molinio-Arrhenatheretea* отмечена в табл. 6. Высокой активностью характеризуются *Rumex confertus* (24,6 %), *Cirsium arvense* (22,6 %), *Pyrus communis* L. (13,8 %), *Bidens frondosa* (8,1 %), Травянистые растения из этого списка являются видами-трансформерами и активно вытесняют аборигенные виды, часто формируя свои ценозы.

Таблица 5

Адвентивный компонент ценофлоры союзов луговой растительности поймы р. Днепр

Table 5

Adventive component of the alliance cenoflora of Dnieper river floodplain grassland vegetation

| Синтаксон                                              | Аборигенная фракция, количество видов | Адвентивная фракция, количество видов |              |      |               |      |                       |     |      |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------|------|---------------|------|-----------------------|-----|------|
|                                                        |                                       | общее количество                      | время заноса |      | способ заноса |      | степень натурализации |     |      |
|                                                        |                                       |                                       | арх.         | нео. | ксен.         | ерф. | агр.                  | эп. | кол. |
| <i>Phragmito-Magnocaricetea</i>                        | 189                                   | 20                                    | 12           | 8    | 16            | 4    | 7                     | 13  | —    |
| <i>Magnocaricion gracilis</i>                          | 163                                   | 13                                    | 7            | 6    | 11            | 2    | 6                     | 7   | —    |
| <i>Glycerio-Sparganion</i>                             | 34                                    | 9                                     | 6            | 3    | 9             | —    | 2                     | 7   | —    |
| <i>Eleocharito palustris-Sagittarion sagittifoliae</i> | 73                                    | 4                                     | 2            | 2    | 3             | 1    | 3                     | 1   | —    |
| <i>Phragmition communis</i>                            | 86                                    | 9                                     | 6            | 3    | 5             | 4    | 5                     | 4   | —    |
| <i>Molinio-Arrhenatheretea</i>                         | 276                                   | 53                                    | 31           | 22   | 40            | 13   | 19                    | 32  | 2    |
| <i>Filipendulion ulmariae</i>                          | 28                                    | 2                                     | 1            | 1    | 2             | —    | 1                     | 1   | —    |
| <i>Deschampsion cespitosae</i>                         | 189                                   | 33                                    | 21           | 12   | 24            | 9    | 11                    | 20  | 2    |
| <i>Molinion caeruleae</i>                              | 73                                    | 2                                     | 2            | —    | 1             | 1    | —                     | 1   | 1    |
| <i>Arrhenatherion elatioris</i>                        | 122                                   | 22                                    | 14           | 8    | 13            | 9    | 10                    | 11  | 1    |
| <i>Agrostion vinealis</i>                              | 183                                   | 29                                    | 18           | 11   | 26            | 3    | 10                    | 18  | 1    |
| <i>Potentillion anserinae</i>                          | 91                                    | 11                                    | 5            | 6    | 7             | 4    | 4                     | 6   | 1    |

Примечание. Арх. — археофиты, нео. — неофиты, ксен. — ксенофиты, ерф. — эргазифитофиты, агр. — агрофиты, эп. — эпифиты, кол. — колонофиты.

Таблица 6

Встречаемость адвентивных видов в ценофлоре класса *Molinio-Arrhenatheretea*, %

Table 6

Occurrence of adventive species in the cenoflora of the class *Molinio-Arrhenatheretea*, %

| Вид                                | <i>MOL.-ARR.</i> | <i>Fil. ulm.</i> | <i>Des. ces.</i> | <i>Mol. caer.</i> | <i>Arr. elat.</i> | <i>Agr. vin.</i> | <i>Pot. ans.</i> |
|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| <i>Acer negundo</i>                | 1,7              | —                | 2,3              | —                 | 4,5               | —                | —                |
| <i>Amaranthus retroflexus</i>      | 0,3              | —                | 0,6              | —                 | —                 | —                | —                |
| <i>Anthemis ruthenica</i>          | 1                | —                | —                | —                 | —                 | 4,3              | —                |
| <i>Arctium lappa</i>               | 0,3              | —                | 0,6              | —                 | —                 | —                | —                |
| <i>Artemisia abrotanum</i>         | 1,3              | —                | —                | —                 | 4,5               | 4,3              | —                |
| <i>Artemisia absinthium</i>        | 1,7              | —                | —                | —                 | 4,5               | 5,7              | —                |
| <i>Berteroa incana</i>             | 2,7              | —                | 0,6              | —                 | —                 | 10               | —                |
| <i>Bidens frondosa</i>             | 8,1              | —                | 7,5              | —                 | —                 | 5,7              | 35               |
| <i>Bromus mollis</i>               | 2,7              | —                | 1,1              | —                 | 13,6              | 4,3              | —                |
| <i>Capsella bursa-pastoris</i>     | 0,7              | —                | 0,6              | —                 | —                 | 1,4              | —                |
| <i>Carduus acanthoides</i>         | 0,3              | —                | —                | —                 | 4,5               | —                | —                |
| <i>Carum carvi</i>                 | 0,3              | —                | —                | —                 | 4,5               | —                | —                |
| <i>Chaiturus marrubiastrum</i>     | 0,3              | —                | —                | —                 | —                 | —                | 5                |
| <i>Chenopodium album</i>           | 1,3              | —                | 1,7              | —                 | —                 | 1,4              | —                |
| <i>Cichorium intybus</i>           | 1                | —                | 0,6              | —                 | 4,5               | —                | 5                |
| <i>Cirsium arvense</i>             | 22,6             | 50               | 28,7             | —                 | 45,5              | 7,1              | 5                |
| <i>Convolvulus arvensis</i>        | 0,3              | —                | 0,6              | —                 | —                 | —                | —                |
| <i>Conyza canadensis</i>           | 2,4              | —                | 1,1              | —                 | —                 | 7,1              | —                |
| <i>Cuscuta epilinum</i>            | 0,7              | —                | 1,1              | —                 | —                 | —                | —                |
| <i>Daucus carota</i>               | 1,7              | —                | 0,6              | —                 | 9,1               | 2,9              | —                |
| <i>Echinocystis lobata</i>         | 2,4              | —                | 2,9              | —                 | —                 | —                | 10               |
| <i>Erodium cicutarium</i>          | 0,3              | —                | —                | —                 | —                 | 1,4              | —                |
| <i>Erysimum cheiranthoides</i>     | 0,3              | —                | 0,6              | —                 | —                 | —                | —                |
| <i>Festuca arundinacea</i>         | 0,7              | —                | —                | —                 | 9,1               | —                | —                |
| <i>Festuca trachyphylla</i>        | 0,7              | —                | —                | —                 | —                 | 2,9              | —                |
| <i>Hippophae rhamnoides</i>        | 0,3              | —                | 0,6              | —                 | —                 | —                | —                |
| <i>Juncus tenuis</i>               | 0,3              | —                | —                | —                 | —                 | —                | 5                |
| <i>Lactuca serriola</i>            | 1,3              | —                | 0,6              | —                 | —                 | 4,3              | —                |
| <i>Linaria vulgaris</i>            | 0,3              | —                | —                | —                 | —                 | 1,4              | —                |
| <i>Lolium perenne</i>              | 0,7              | —                | —                | —                 | 9,1               | —                | —                |
| <i>Malus domestica</i>             | 3                | —                | 4                | —                 | 4,5               | 1,4              | —                |
| <i>Melandrium album</i>            | 1,3              | —                | 0,6              | —                 | 4,5               | 2,9              | —                |
| <i>Melilotus albus</i>             | 0,3              | —                | 0,6              | —                 | —                 | —                | —                |
| <i>Oenothera biennis</i>           | 1                | —                | —                | —                 | 4,5               | 2,9              | —                |
| <i>Oenothera rubricaulis</i>       | 1                | —                | 0,6              | —                 | 0                 | 2,9              | —                |
| <i>Phalacroloma annuum</i>         | 1,2              | —                | —                | 11,1              | 0                 | 4,3              | —                |
| <i>Phalacroloma septentrionale</i> | 2                | —                | —                | —                 | 4,5               | 7,1              | —                |
| <i>Polygonum arenastrum</i>        | 0,7              | —                | —                | —                 | —                 | 1,4              | 5                |
| <i>Populus alba</i>                | 0,3              | —                | 0,6              | —                 | —                 | —                | —                |
| <i>Potentilla norvegica</i>        | 0,7              | —                | 0,6              | —                 | 4,5               | —                | —                |

Окончание табл. 6

Ending table 6

| Вид                       | MOL.-ARR. | Fil. ulm. | Des. ces. | Mol. caer. | Arr. elat. | Agr. vin. | Pot. ans. |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|
| <i>Pyrus communis</i>     | 13,8      | —         | 9,8       | 22,2       | 9,1        | 27,1      | 5         |
| <i>Rosa canina</i>        | 0,3       | —         | 0,6       | —          | —          | —         | —         |
| <i>Rumex confertus</i>    | 24,6      | 50        | 31        | —          | 31,8       | 10        | 20        |
| <i>Salix euxina</i>       | 2         | —         | 2,3       | —          | 9,1        | —         | —         |
| <i>Setaria viridis</i>    | 0,3       | —         | 0,6       | —          | —          | —         | —         |
| <i>Tanacetum vulgare</i>  | 3         | —         | —         | —          | 9,1        | 10        | —         |
| <i>Trifolium hybridum</i> | 0,7       | —         | —         | —          | 4,5        | —         | 5         |
| <i>Veronica arvensis</i>  | 0,7       | —         | —         | —          | —          | 2,9       | —         |
| <i>Veronica peregrina</i> | 0,3       | —         | 0,6       | —          | —          | —         | —         |
| <i>Vicia angustifolia</i> | 1         | —         | 0,6       | —          | 4,5        | 1,4       | —         |
| <i>Vicia tetrasperma</i>  | 0,7       | —         | 0,6       | —          | —          | 1,4       | —         |
| <i>Viola arvensis</i>     | 0,3       | —         | —         | —          | —          | 1,4       | —         |
| <i>Xanthium albinum</i>   | 1,3       | —         | 1,1       | —          | —          | —         | 10        |

Примечание. MOL.-ARR. – класс *Molinio-Arrhenatheretea*, Fil. ulm. – союз *Filipendulion ulmariae*, Des. ces. – союз *Deschampsion cespitosae*, Mol. caer. – союз *Molinion caeruleae*, Arr. elat. – союз *Arrhenatherion elatioris*, Agr. vin. – союз *Agrostion vinealis*, Pot. ans. – союз *Potentillion anserinae*.

Особенности встречаемости адвентивных видов в ценофлоре класса *Phragmito-Magnocaricetea* представлены в табл. 7. Высокой активностью отличаются *Cirsium arvense* (7,2 %), *Bidens frondosa* (5,1 %), *Xanthium albinum* (5,1 %) и *Acorus calamus* (4,2 %), являющиеся видами-трансформерами.

В исследуемых сообществах по времени заноса преобладают археофиты (*Cirsium arvense*, *Malus domestica* (Suckow) Borkh., *Lactuca serriola* L., *Salix euxina*, *Acorus calamus* и др.), которые составляют 60 % чужеродных видов в классе *Phragmito-Magnocaricetea* и 58,5 % – в классе *Molinio-Arrhenatheretea*. По степени натурализации доминируют эпекофиты (*Cirsium arvense*, *Lactuca serriola*, *Xanthium albinum*, *Bromus mollis*, *Phalacrolooma annuum* и др.), по способу заноса – ксенофиты (*Rumex confertus*, *Lactuca serriola*, *Cirsium arvense*, *Bidens frondosa*, *Xanthium albinum*, *Acorus calamus* и др.).

Таблица 7

Встречаемость адвентивных видов в ценофлоре класса *Phragmito-Magnocaricetea*, %

Table 7

The occurrence of adventive species in the coenoflora of the class *Phragmito-Magnocaricetea*, %

| Вид                            | PHRAG.-MAGN. | Magn. grac. | Glyc.-Sp. | Eleoch. pal.-Sag. sag. | Phr. com. |
|--------------------------------|--------------|-------------|-----------|------------------------|-----------|
| <i>Acorus calamus</i>          | 4,2          | 3,9         | 33,3      | 4,1                    | 2,6       |
| <i>Atriplex prostrata</i>      | 0,8          | —           | 66,7      | —                      | —         |
| <i>Bidens frondosa</i>         | 5,1          | 3,3         | 66,7      | 4,1                    | 8         |
| <i>Chaiturus marrubiastrum</i> | 0,4          | —           | 33,3      | —                      | —         |
| <i>Chenopodium album</i>       | 0,8          | 1,1         | —         | —                      | —         |
| <i>Chenopodium rubrum</i>      | 0,4          | —           | —         | 7,1                    | —         |
| <i>Cirsium arvense</i>         | 7,2          | 7,7         | 33,3      | —                      | 5,3       |
| <i>Cuscuta epilinum</i>        | 0,4          | 0,6         | —         | —                      | —         |
| <i>Echinocystis lobata</i>     | 3            | 2,8         | —         | 7,1                    | 2,6       |
| <i>Fallopia dumetorum</i>      | 1,3          | 0,6         | 33,3      | —                      | 2,6       |
| <i>Galium aparine</i>          | 0,4          | —           | —         | —                      | 2,6       |
| <i>Juncus tenuis</i>           | 0,4          | 0,6         | —         | —                      | —         |

| Вид                                 | PHRAG.-MAGN. | Magn. grac. | Glyc.-Sp. | Eleoch. pal.-Sag. sag. | Phr. com. |
|-------------------------------------|--------------|-------------|-----------|------------------------|-----------|
| <i>Lactuca serriola</i>             | 0,8          | 0,6         | 33,3      | —                      | —         |
| <i>Linaria vulgaris</i>             | 0,4          | 0,6         | —         | —                      | —         |
| <i>Malus domestica</i>              | 0,4          | —           | —         | —                      | 2,6       |
| <i>Phalacrolooma septentrionale</i> | 0,4          | —           | 33,3      | —                      | —         |
| <i>Rosa subcanina</i>               | 0,4          | —           | —         | —                      | 2,6       |
| <i>Rumex confertus</i>              | 2,5          | 3,3         | —         | —                      | —         |
| <i>Salix euxina</i>                 | 2,1          | 2,2         | —         | —                      | 2,6       |
| <i>Xanthium albinum</i>             | 1,3          | 0,6         | 66,7      | —                      | —         |

Примечание. PHRAG.-MAGN. – PHRAG.-MAGN. – класс Phragmito-Magnocaricetea, Magn. grac. – союз Magnocaricion gracilis, Glyc.-Sp. – союз Eleocharito palustris-Sagittarion sagittifoliae, Phrag. com. – союз Phragmition communis.

Заключение

На пойменных лугах р. Днепр выявлен 381 вид сосудистых растений, относящийся к 208 родам и 70 семействам. Отмечено 3 вида, занесенных в Красную книгу Республики Беларусь (*Iris sibirica*, *Galatella rossica*, *Salvinia natans*), и 5 видов, нуждающихся в профилактической охране (*Bistorta major*, *Dactylorhiza baltica*, *Dactylorhiza incarnata*, *Gentiana pneumonanthe*, *Lotus uliginosus*).

Проведенный таксономический анализ показал особенности ценофлоры луговой растительности р. Днепр в зависимости от экологических условий их формирования. Объем ценофлоры класса *Molinio-Arrhenatheretea* (329 видов) значительно превышает объем ценофлоры класса *Phragmito-Magnocaricetea* (210 видов), что свидетельствует о значительном превышении видового богатства остепненных и настоящих лугов над болотистыми и торфянистыми.

В луговых фитоценозах поймы р. Днепр отмечено 48 доминантных видов, из которых злаки составляют 25 видов (52 %), осоки – 12 (25 %), разнотравье – 11 видов (23 %). Наиболее константными доминантами являются *Alopecurus pratensis* (частота доминирования в луговых сообществах – 15,8 %), *Carex acuta* (12,8), *Phalaroides arundinacea* (12,8), *Galium physocarpum* (9), *Glyceria maxima* (6,4), *Carex praecox* (5,4 %).

Доля адвентивных растений в исследуемой ценофлоре составляет 15,5 % (59 видов), которые относятся к 52 родам и 24 семействам. Выявлено 7 инвазионных видов растений, включенных в Черную книгу флоры Беларуси: *Acorus calamus*, *Bidens frondosa*, *Conyza canadensis*, *Echinocystis lobata*, *Oenothera biennis*, *Rumex confertus* и *Xanthium albinum*.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой значимости пойменных ландшафтов как центров концентрации флористического и ценотического разнообразия луговой растительности и необходимости охраны этих биотопов.

Библиографические ссылки

1. Куликова ЕЯ, Добыш КВ, Ермоленкова ГВ. Фитоценотическая структура и качественная оценка пойменных лугов урочищ «Туровский луг» и «Погост» (р. Припять, Республика Беларусь). В: *Актуальные проблемы изучения и сохранения флоры и микробиоты. Материалы IV Международной научно-практической конференции, приуроченной к 100-летию кафедры ботаники БГУ, Минск, 31 мая 2021 г. Республика Беларусь*. Минск: БГУ; 2021. с. 92–96.

2. Мартыненко ВА. *Флористический состав кормовых угодий европейского Северо-Востока*. Ленинград: Наука. Ленинградское отделение; 1989. 134 с.

3. Одум Ю. *Основы экологии*. Москва: Мир; 1975. 740 с.

4. Максимов АА. *Структура и динамика биоценозов речных долин*. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение; 1974. 260 с.

5. Дзісько НА, Курловіч ММ, Малашэвіч ЯВ, и др. *Бялітая кніга Беларусі. Энцыклапедыя*. Минск: Беларуская Энцыклапедыя імя Петруся Броўкі; 1994. 415 с.

6. Юркевич ИД, Голод ДС, Адериho BC. *Растительность Белоруссии, ее картографирование, охрана и использование*. Минск: Наука и техника; 1979. 246 с.

7. Роговой ПП, Янович ИП. *Поймы рек Днепра, Сожа и Припяти и их хозяйственное использование*. Минск: Государственное издательство БССР; 1957. 237 с.

8. Ларин ИВ. Методика изучения пастбищ по непосредственным опытам со скотом. В: *Полевая геоботаника*. Москва – Ленинград: Издательство Акад. наук СССР; 1959. Том 1. с. 7–27.

9. Hennekens SM, Schaminee JHJ. Turboveg, a comprehensive database management system for vegetation data. *Journal of Vegetation Science*. 2001;12(4):589–591. DOI: 10.2307/3237010.
10. Цвелев НН. *Определитель сосудистых растений Северо-Западной России (Ленинградская, Псковская и Новгородская области)*. Санкт-Петербург: Издательство СПХФА; 2000. 781 с.
11. Royal Botanic Gardens, Kew [Internet, cited 2024 May 17]. Plants of the World Online. Available from: <http://www.powo.science.kew.org>.
12. Braun-Blanquet J. *Pflanzensoziologie: Grundzüge der Vegetationskunde*. Wien – New York: Springer-Verlag; 1964. 866 с.
13. Mucina L, Bultmann H, Dierßen K, et al. Vegetation of Europe: hierarchical floristic classification system of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities. *Applied Vegetation Science*. 2016;19(1):3–264. DOI: 10.1111/avsc.12257.
14. Raunkiaer C. *The life forms of plants and statistical plant geography*. Oxford: At the Clarendon Press; 1934. 632 с.
15. Dřevojan P, Čeplová N, Štěpánková P, Axmanová I. [Internet, cited 2024 May 17]. Life form. Available from: <http://www.FloraVeg.eu>.
16. Третьяков ДИ. Адвентивная фракция флоры Беларуси и ее становление. В: *Изучение биологического разнообразия методами сравнительной флористики. Материалы IV рабочего совещания по сравнительной флористике, Березинский биосферный Заповедник, 1993*. Санкт-Петербург: СПбГУ (НИИХ); 1998. с. 250–259.
17. Дубовик ДВ. Адвентивные виды растений во флоре Беларуси и их инвазионный потенциал. В: *Современное состояние, тенденции развития, рациональное использование и сохранение биологического разнообразия растительного мира (Минск – Нарочь, 23–26 сентября 2014 г.)*. Минск: Экоперспектива; 2014. с. 184–186.
18. Дубовик ДВ, Дмитриева СА, Ламан НА и др. *Черная книга флоры Беларуси: Чужеродные вредоносные растения*. Минск: Беларуская навука; 2020. 407 с.
19. Мялик АН. Инвазионные виды во флоре Припятского Полесья. *Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук*. 2016;1:117–123.
20. Майоров СР, Бочкин ВД, Насимович ЮА. *Адвентивная флора Москвы и Московской области*. Москва: Товарищество научных изданий КМК; 2012. 412 с.
21. Протопопова ВВ. *Синантропная флора Украины и пути её развития*. Киев: Наукова думка; 1991. 204 с.
22. Pyšek P, Sádlo J, Chrtěk JJr, et al. Catalogue of alien plants of the Czech Republic: species richness, status, distributions, habitats, regional invasion levels, introduction pathways and impacts. *Preslia*. 2022;94(4):447–577. DOI: 10.23855/preslia.2022.447.
23. Санько ПМ. *Естественные луга Белоруссии, их характеристика и оценка*. Минск: Наука и техника; 1983. 247 с.
24. Дубовик ДВ. Количественный состав и флорогенетические особенности флоры восточной части Беларуси. *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы*. 2008;2(68):135–141.
25. Козловская НВ. *Флора Белоруссии, закономерности ее формирования, научные основы использования и охраны*. Минск: Наука и техника; 1978. 126 с.
26. Хохряков АП. Таксономические спектры и их роль в сравнительной флористике. *Ботанический журнал*. 2000;85(5):1–11.
27. Шмидт ВМ. Количественные показатели в сравнительной флористике. *Ботанический журнал*; 1974;59(7):929–940.

## References

1. Kulikova EY, Dobysh KV, Ermolenkova GV. Phytocenotic structure and qualitative assessment of floodland grasslands of the «Turovsky meadow» and «Pogost» (r. Pripyat, Republic of Belarus). V: *Aktual'nye problemy izucheniya i sohraneniya fito- i mikrobioty. Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii, priurochennoy k 100-letiyu kafedry botaniki BGU, Minsk, 31 maya 2021 g. Respublika Belarus* [Actual problems of studying and preserving phyto- and mycobiota. Materials of the IV International Scientific and Practical Conference, timed. on the 100th anniversary of the Botany Department of BSU, Republic of Belarus, Minsk, 2021 May 31]. Minsk: BSU; 2021:92–96. Russian.
2. Martynenko VA. *Floristicheskij sostav kormovyh ugodij evropejskogo Severo-Vostoka* [Floristic composition of grasslands of the European Northeast]. Leningrad: Nauka, Leningrad Branch; 1989. 134 p. Russian.
3. Odum E. *Fundamentals of Ecology*. Moscow: Mir; 1975. 740 p. Russian.
4. Maksimov AA. *Struktura i dinamika biocenozov rechnyh dolin* [Structure and dynamics of river valleys biocenoses]. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch; 1974. 260 p. Russian.
5. Disko NA, Kurlovich NN, Malashevich EV6 et al. *Blakitnaya kniga Belarusi: Encyklopedyya*. [The Blue Book of Belarus: Encyclopedia]. Minsk: Belarusian Encyclopedia named of the Petrusya Brovka; 1994. 415 с. Belarusian.
6. Yurkevich ID, Golod DS, Aderiho VS. *Растительность Белоруссии, ее картографирование, охрана и использование* [Vegetation of Belarus, its cartography, protection and utilization]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1979. Russian.
7. Rogovoy PP, Yanovich IP. *Pojmy rek Dnepra, Sozha i Pripyati i ih hozyajstvennoe ispol'zovanie* [Floodplains of the Dnieper, Sozh and Pripyat rivers and their economic use]. Minsk: Gosudarstvennoe izdatelstvo BSSR; 1957. 237 p. Russian.
8. Larin IV. Methods of studying pastures by direct experience with cattle. In: *Field geobotany*. Moscow – Leningrad: Academy of Sciences of the USSR press; 1959. Volume 1:7–27. Russian.
9. Hennekens SM, Schaminee JHJ. Turboveg, a comprehensive database management system for vegetation data. *Journal of Vegetation Science*. 2001;12(4):589–591. DOI: 10.2307/3237010.
10. Tzvelev NN. *Manual of the vascular plants of North-Western Russia (Leningrad, Pskov and Novgorod provinces)*. Sankt-Peterburg: Publishing House SPHFA; 2000:781. Russian.
11. Royal Botanic Gardens, Kew [Internet, cited 2024 May 17]. Plants of the World Online. Available from: <http://www.powo.science.kew.org>.
12. Braun-Blanquet J. *Pflanzensoziologie: Grundzüge der Vegetationskunde*. Wien · New York: Springer-Verlag; 1964. 866 с.
13. Mucina L, Bultmann H, Dierßen K, et al. Vegetation of Europe: hierarchical floristic classification system of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities. *Applied Vegetation Science*. 2016;19(1):3–264. DOI: 10.1111/avsc.12257.
14. Raunkiaer C. *The life forms of plants and statistical plant geography*. Oxford: At the Clarendon Press; 1934. 632 с.
15. Dřevojan P, Čeplová N, Štěpánková P, Axmanová I. [Internet, cited 2024 May 17]. Life form. Available from: <http://www.FloraVeg.eu>.

16. Tretyakov DI. The adventitious fraction of the flora of Belarus and its formation. V: *Izuchenie biologicheskogo raznoobraziya metodami sravnitel'noj floristiki: materialy IV rab. soveshch. po sravn. floristike, Berezinskij biosfernyj Zapovednik, 1993* [In: The study of biological diversity by methods of comparative floristics: materials of the IV workshop on comparative floristics, Berezinsky Biosphere Reserve, 1993]. Saint Petersburg: SPbSU (NIIH); 1998:250–259. Russian.
17. Dubovik DV. Adventitious plant species in the flora of Belarus and their invasive potential. V: *Sovremennoe sostoyanie, tendencii razvitiya, racional'noe ispol'zovanie i sohranenie biologicheskogo raznoobraziya rastitel'nogo mira (Minsk – Naroch', 23–26 sentyabrya 2014 g.)* [Current state, development trends, rational use and conservation of biological diversity of the plant world (Minsk – Naroch, 2014 September 23–26)]. Minsk: Ekoperspektiva; 2014:184–186. Russian.
18. Dubovik DV, Dmitrieva SA, Laman NA. *Chernaya kniga flory Belarusi: Chuzherodnye vredonosnye rasteniya* [The Black Book of the flora of Belarus: Alien harmful plants]. Minsk: Belorusskaya navuka; 2020. 407 p. Russian.
19. Myalik AH. *Invazionnye vidy vo flore Pripyatskogo Poles'ya*. [Invasive species in the flora of the Pripyat Polesie]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*. 2016;1:117–123. Russian.
20. Mayorov SR, Bochkin VD, Nasimovich YuA. *Adventivnaya flora Moskvy i Moskovskoj oblasti* [The adventive flora of Moscow and Moscow region]. Moscow: Tovarihschestvo nauchnyh izdaniy KMK; 2012. 412 p. Russian.
21. Protopopova VV. *Sinantropnaya flora Ukrainy i puti eyo razvitiya* [Synanthropic flora of Ukraine and ways of its development]. Kiev: Naukova dumka; 1991. 204 p. Russian.
22. Pysek P, Sadlo J, Chrtek JJr, et al. Catalogue of alien plants of the Czech Republic: species richness, status, distributions, habitats, regional invasion levels, introduction pathways and impacts. *Preslia*. 2022;94(4):447–577. DOI: 10.23855/preslia.2022.447.
23. Sanko PM. *Estestvennye luga Belorussii, ih harakteristika i ocenka* [Natural grasslands of Belarus, their characteristics and assessment]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1983. 247 p. Russian.
24. Dubovik DV. *Kolichestvennyj sostav i florogeneticheskie osobennosti flory vostochnoj chasti Belarusi* [Quantitative composition and florogenetic features of the flora of the eastern part of Belarus]. *Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno*. 2008;2(68):135–141. Russian.
25. Kozlovskaya NV. *Flora Belorussii, zakonomernosti ee formirovaniya, nauchnye osnovy ispol'zovaniya i ohrany* [Flora of Belarus, patterns of its formation, scientific bases of use and protection]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1978. 126 p. Russian.
26. Khokhryakov AP. *Taksonomicheskie spektry i ih rol' v sravnitel'noj floristike* [Taxonomic spectra and their role in comparative floristics]. *Botanicheskij zhurnal*. 2000;85(5):1–11. Russian.
27. Schmidt VM. *Kolichestvennye pokazateli v sravnitel'noj floristike* [The quantitative indices in comparative study of floras]. *Botanicheskij zhurnal*. 1974;59(7):929–940. Russian.

Статья поступила в редколлегию 01.09.2024.  
Received by editorial board 01.09.2024.

## ПРИДОРОЖНЫЕ ФИТОЦЕНОЗЫ В УСЛОВИЯХ ЭРОЗИИ И ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ПОЧВОГРУНТОВ СОЛЕВЫМИ КОМПОНЕНТАМИ ПРОТИВОГОЛОЛЕДНЫХ РЕАГЕНТОВ

Е. С. ШАВАЛДА<sup>1),2)</sup>, А. Ю. КОМАР<sup>1)</sup>, А. В. СУДНИК<sup>1)</sup>, А. Н. БАТЯН<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича, Национальная академия наук Беларуси,  
ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,  
Белорусский государственный университет,  
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

Описаны придорожные фитоценозы вдоль полосы отвода автодорог г. Минска и Минской обл. Выделенные синтаксоны относятся к 3 классам – *Polygono-Poetea annuae*, *Artemisietea vulgaris* и *Molinio-Arrhenatheretea*, включающие 4 порядка, 5 союзов, 11 ассоциаций и 2 безранговых сообщества. Нахождение выделенных фитоценозов (13 шт.) отражает различия в условиях произрастания в пределах полосы отвода – положение в полосе отвода (кюветы, откосы и др.), интенсивность эрозии почвогрунтов, засоление вследствие использования противогололедных реагентов и другие антропогенные факторы. Проведена оценка степени эрозии придорожных почв и их засоления в результате использования противогололедных реагентов в зависимости от конструкции полосы отвода. Наибольшей эрозии подвержены экспозиции «Выемка» и «Насыпь» – средний балл составил 2,7 из 4,0, а максимальная площадь эрозии почвогрунтов отмечается на участках непосредственно у дорожного полотна всех экспозиций и на откосах «Выемок» – средний балл 3,0–4,0. Характерны признаки миграции ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  между почвенными горизонтами 0–10 см и 10–20 см в пределах полосы отвода в течение сезона вегетации – содержание ионов в весенний период было преимущественно выше в верхнем горизонте (0–10 см); летом концентрация ионов была выше в нижнем горизонте (10–20 см), однако в условиях капиллярного подъема минерализованных растворов к поверхностному слою показатели оставались близки верхнему горизонту (0–10 см). Индекс интенсивности солевого воздействия (ИСВ) показал средний и высокий уровень влияния солей на растительность в «Нулевом положении» и «Насыпи». ИСВ в «Выемке» сохраняется в пределах допустимого уровня. Полученные данные о структуре фитоценозов в условиях их произрастания позволили выработать ряд рекомендаций по уходу за полосой отвода и созданию устойчивого придорожного газона.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога; полоса отвода; придорожная растительность; эрозия почв; противогололедные реагенты; антропогенное засоление; хлориды; водорастворимый натрий.

**Благодарность.** Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант НАУКА М № Б23М-001 от 2 мая 2023 г.).

### Образец цитирования:

Шавалда ЕС, Комар АЮ, Судник АВ, Батян АН. Придорожные фитоценозы в условиях эрозии и загрязненности почвогрунтов солевыми компонентами противогололедных реагентов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;3:33–48.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-33-48>

### For citation:

Shavalda YaS, Komar AYU, Sudnik AV, Batyan AN. Roadside phytocenoses under conditions of erosion and soil pollution with salt components of deicing reagents. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;3:33–48. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-33-48>

### Авторы:

**Евгений Сергеевич Шавалда** – научный сотрудник лаборатории оптимизации и мониторинга экосистем<sup>1)</sup>; преподаватель кафедры экологической медицины и радиобиологии<sup>2)</sup>.

**Артур Юрьевич Комар** – научный сотрудник лаборатории оптимизации и мониторинга экосистем.

**Александр Владимирович Судник** – кандидат биологических наук, доцент; заведующий лабораторией оптимизации и мониторинга экосистем.

**Анатолий Николаевич Батян** – доктор медицинских наук, профессор; заведующий кафедрой экологической медицины и радиобиологии.

### Authors:

**Yauheni S. Shavalda**, researcher at the laboratory of optimization and ecosystems monitoring<sup>a</sup>; lecturer of the department of environmental medicine and radiobiology<sup>b</sup>.

[e.shavalda@gmail.com](mailto:e.shavalda@gmail.com)

**Artur Yu. Komar**, researcher at the laboratory of optimization and ecosystems monitoring.

[artur.komar@tut.by](mailto:artur.komar@tut.by)

**Aliaksandr V. Sudnik**, PhD (biology), docent; head of the laboratory of optimization and monitoring.

[asudnik@tut.by](mailto:asudnik@tut.by)

**Anatoly N. Batian**, doctor of science (medicine), full professor; head of the department of environmental medicine and radiobiology.  
[ant\\_b@tut.by](mailto:ant_b@tut.by)

## ROADSIDE PHYTOCOENOSES UNDER CONDITIONS OF EROSION AND SOIL POLLUTION WITH SALT COMPONENTS OF DEICING REAGENTS

Ya. S. SHAVALDA<sup>a,b</sup>, A. Yu. KOMAR<sup>a</sup>, A. V. SUDNIK<sup>a</sup>, A. N. BATYAN<sup>b</sup>

<sup>a</sup>V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany, National Academy of Sciences of Belarus  
27 Akademičnaja Street, Minsk 220072, Belarus

<sup>b</sup>International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,  
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

Corresponding author: Ya. S. Shavalda (e.shavalda@gmail.com)

Roadside phytocenoses along the right-of-way of highways in Minsk and the Minsk region are described. The identified syntaxa belong to 3 classes – *Polygono-Poetea annuae*, *Artemisietea vulgaris* and *Molinio-Arrhenatheretea*, including 4 orders, 5 unions, 11 associations and 2 unranked communities. The presence of identified phytocenoses (13 pcs.) reflects differences in growing conditions within the right-of-way – position in the right-of-way (ditches, slopes, etc.), intensity of soil erosion, salinization due to the use of de-icing reagents and other anthropogenic factors. An assessment was made of the degree of erosion of roadside soils and their salinization as a result of the use of de-icing reagents, depending on the design of the right-of-way. The «Notch» and «Embankment» exposures are subject to the greatest erosion – the average score was 2,7 out of 4,0, and the maximum area of soil erosion is observed in areas directly next to the roadway of all exposures and on the slopes of the «Notch» – an average score of 3,0–4,0. There are characteristic signs of migration of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> ions between soil horizons of 0–10 cm and 10–20 cm within the right-of-way during the growing season – the content of ions in the spring was predominantly higher in the upper horizon (0–10 cm); in summer, the ion concentration was higher in the lower horizon (10–20 cm), however, under conditions of capillary rise of mineralized solutions to the surface layer, the indicators remained close to the upper horizon (0–10 cm). The salt impact intensity index (SII) showed a medium and high level of salt influence on vegetation in the «zero position» and «Embankment». The SII in the «Notch» is maintained within the acceptable level. The data obtained on the structure of phytocenoses under their growing conditions made it possible to develop recommendations for caring for the right-of-way and creating a sustainable roadside lawn.

**Keywords:** highway; right-of-way; roadside vegetation; soil erosion; de-icing reagents; anthropogenic salinization; chlorides; water-soluble sodium.

**Acknowledgements.** The work was carried out with financial support from the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (grant NAUKA M № B23M-001 dated May 2, 2023).

### Введение

Комплекс антропогенных факторов вдоль автомобильных дорог приводит к трансформации придорожной растительности. Фитоценозы характеризуются нестабильностью флористического состава, вызванной наличием внутри- и межсезонных флуктуаций и сукцессий вследствие специфики антропогенного воздействия (периодичность сезонного кошения, состояние полосы отвода, подсыпание почвогрунта и подсеивание семян придорожных травосмесей) в придорожных территориях. В сообществах широко представлены виды сорно-рудеральной растительности вследствие регрессионных изменений [1]. Для придорожных фитоценозов характерно снижение доли аборигенных видов с ростом антропофитов [2].

Одним из важных факторов негативного воздействия на придорожную растительность является засоление вследствие сезонного использования противогололедных солевых реагентов (ПГР), на 95–98 % представленных NaCl. В результате засоления компонентами ПГР происходит изменение кислотности почв, ионообменных свойств органогенных горизонтов и характера естественных миграционных потоков элементов в системе «почва – растение» [3; 4]. Избыточное засоление приводит к изменению структуры придорожных почв: мелкие частицы грунта удерживают Na<sup>+</sup>, что приводит к снижению связности почвенных частиц и влияет на развитие эрозионных процессов, вымывание питательных веществ из грунта, рост количества мелкодисперсных пылевых частиц. Снижается способность корнями всасывать насыщенный солями водный раствор – эффект солевой засухи в условиях избытка воды. Избыток солей в почве приводит к ее подщелачиванию, что также изменяет состав и структуру фитоценозов, снижает доступность питательных веществ [5; 6].

Высокое засоление внешне сопровождается солевым ожогом, недоразвитостью побегов, уменьшением содержания хлорофилла, некрозом края листьев с последующим их отмиранием. Увеличение содержания хлоридов приводит к снижению активности почвенной микрофлоры и вызывает ее частичную гибель [3].

Оценивая «порог токсичности» водорастворимого натрия и хлоридов на растительность, не существует общего показателя критического содержания ионов в почве, при которых снижается жизнеспособность растений. В ряде научных работ предлагаются величины для определения «порога токсичности»  $\text{Na}^+$  – 132–260 мг/кг и  $\text{Cl}^-$  – 39–350 мг/кг [7–11].

### Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлась структура придорожной растительности в пределах полосы отвода с анализом степени эрозии почвогрунтов и накоплением в почвогрунте ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  вследствие использования ПГР<sup>1</sup>. Для исследования полосы отвода было заложено 112 эколого-фитоценологических профилей (ЭФП) вдоль магистральных и республиканских автодорог г. Минска и Минской обл., на 9 ЭФП проведен анализ эрозии почвогрунтов с отбором почвенных образцов (рис. 1).

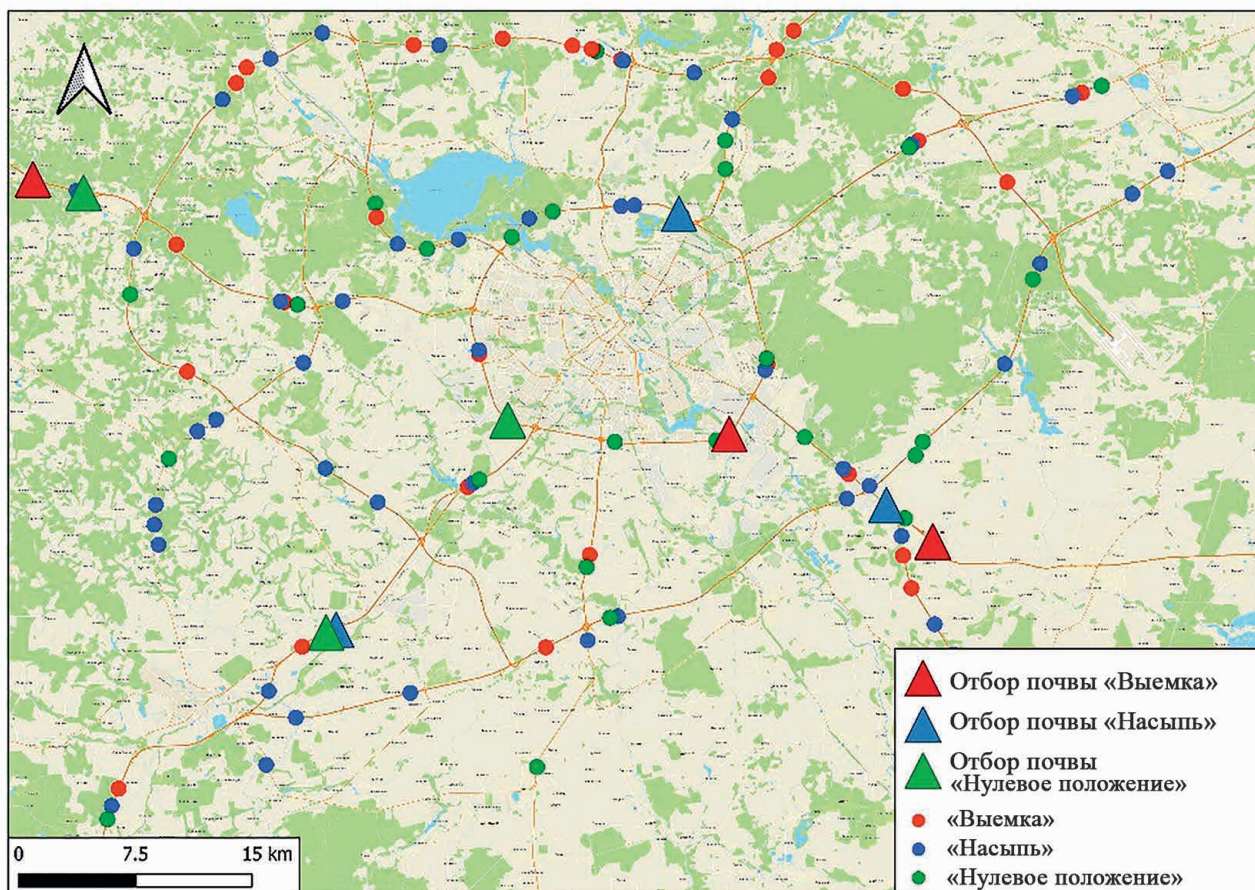


Рис. 1. Участки исследования придорожной растительности в пределах полосы отвода и в зависимости от ее конструкции (экспозиции)

Fig. 1. Areas for studying roadside vegetation within the right-of-way and depending on its design (exposure)

Участки исследования закладывались в трех экспозициях («Выемка», «Насыпь» и «Нулевое положение») с разделением на соответствующие сектора в зависимости от конструкции полосы отвода (рис. 2). Экспозиция «Выемка» была разделена на 4 исследуемых сектора, «Насыпь» и «Нулевое положение» – на 3 по обе стороны от автодороги<sup>2</sup>. Для каждого отмеченного сектора был определен видовой состав [12; 13], синтаксоны с помощью методологии Й. Браун-Бланке [14] и анализ степени эрозии почвогрунтов [15].

<sup>1</sup>Об автомобильных дорогах и дорожной деятельности: Закон Республики Беларусь, 2 декабря 1994 г., № 3434-ХІІ // Ведомстві Нацыянальнага сходу Рэспублікі Беларусь. 1995. № 5. С. 31.

<sup>2</sup>ТКП 302-2018 (33520). Кадастровая оценка сельскохозяйственных земель. Технология работ. Взамен ТКП 302-2011 (03150). Минск: Госкомимущество; 2018. 104 с.

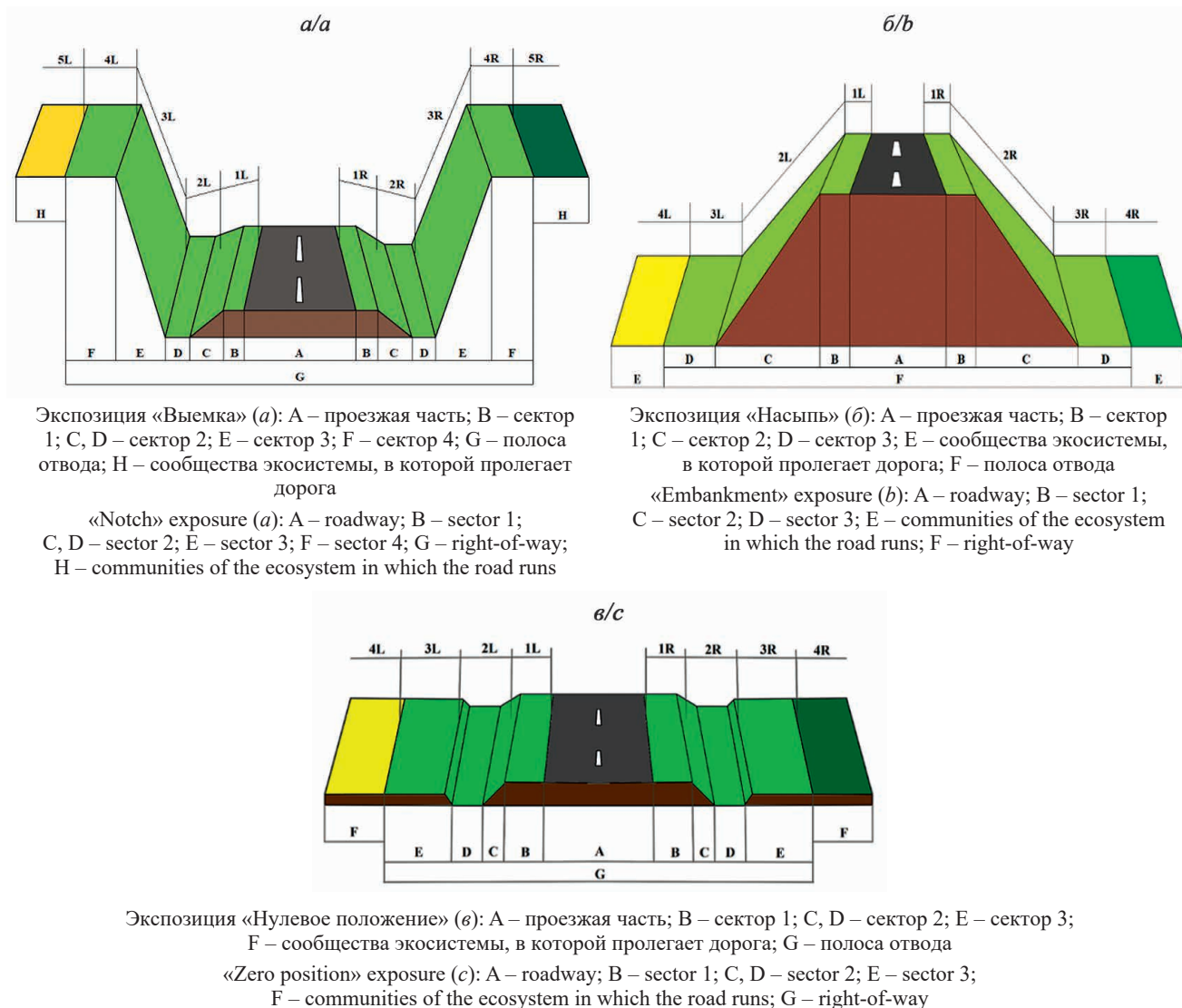


Рис. 2. Структурные части (секторов) полосы отвода для экспозиции «Выемка» (а), «Насыпь» (б), «Нулевое положение» (в)

Fig. 2. Structural parts (sectors) of the right-of-way for «notch» exposure of «Notch» (a), «Embankment» (b) and «Zero position» (c)

Отбор почвенных образцов в летний (август – сентябрь, 60 образцов) и зимне-весенний (март, 60 образцов) периоды проводился с подветренной относительно автодороги стороны (испытывающей преимущественное загрязнение от автодороги)<sup>3</sup>. В каждом секторе выполнялся отбор образцов почвы на глубине 0–10 см и 10–20 см. Разделение в отборе по периодам года связано с использованием ПГР, чья концентрация в почвогрунте предполагает быть выше в зимне-весенний период. Дальнейший анализ образцов на водородный показатель (pH), хлориды и водорастворимый натрий осуществлялся с использованием Иономера И-130, pH-метра STARTER 3100 и Фотометра пламенного автоматического типа BWB XP<sup>4-6</sup>.

В данном исследовании в качестве предела критического содержания солей для растительности в почвогрунте была предложена величина предполагаемого «порога токсичности» для ионов Na<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup> в 100 мг/кг соответственно [16; 17].

Для оценки вероятностного солевого воздействия на растительность в зависимости от засоления придорожных почв был предложен показатель предполагаемого уровня интенсивности солевого воздействия

<sup>3</sup>ГОСТ 17.4.4.022017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. Москва: Стандартинформ, 2018. 12 с.

<sup>4</sup>СТБ 17.13.05-36-2015. Охрана окружающей среды и природопользование. Аналитический (лабораторный) контроль и мониторинг. Качество почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и сухого остатка водной почвенной вытяжки. Минск: Госстандарт, 2016. 13 с.

<sup>5</sup>ГОСТ 26425-85. Почвы. Методы определения иона хлорида в водной вытяжке. Москва: Госстандарт СССР, 1986. 9 с.

<sup>6</sup>Там же. 4 с.

(ИСВ) относительно вероятному «порогу токсичности» в экспозициях и секторах по формуле (1), соответствующей формуле суммарного показателя загрязненности ( $Z_c$ ) [18]:

$$ИСВ = \sum K_{on} - (n - 1), \quad (1)$$

где  $K_o$  – коэффициенты опасности иона ( $Na^+$  или  $Cl^-$ );  
 $n$  – количество исследуемых ионов.

Анализ уровня вероятностного негативного воздействия солевых компонентов ППР проводился по следующим категориям:

- ИСВ (допустимый) –  $<1$ ;
- ИСВ (низкий) –  $1-2$ ;
- ИСВ (средний) –  $2-4$ ;
- ИСВ (высокий) –  $4-16$ ;
- ИСВ (очень высокий) –  $>16$ .

Для определения экологически опасного уровня концентрации для каждого иона в почвогрунте был рассчитан коэффициент опасности ( $K_o$ ) по формуле (2):

$$K_o = \frac{C_{\text{образец}}}{C_{\text{п. т.}}}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{образец}}$  – содержание иона в отобранном образце почвы, мг/кг;

$C_{\text{п. т.}}$  – порог начала вероятностного токсического действия (для  $Na^+$  и  $Cl^-$  началом токсического действия на растительность приняты концентрации 100 мг/кг).

Определение зависимости эрозии придорожных почвогрунтов (площадь территории, подвергнутой эрозии) и накопления в них солей между секторами и по мере удаления от дорожного полотна осуществлялось с помощью коэффициента корреляции ( $r$ ). Анализ данных выполнен с помощью программы *Microsoft Excel*, данные представлены в форме среднего арифметического значения и его стандартной ошибки ( $M \pm m$ ).

### Результаты исследования и их обсуждение

*Эрозия придорожных почв.* В качестве критериев классификации сохранности почвогрунта в пределах полосы отвода был взят процент (%) от изучаемой площади<sup>7</sup>, занятый эрозией почв и существующие классификации антропогенных типов почв [15]. Анализ почвогрунтов основывался на распределении по баллам деградации почв (рис. 3).

1. Почвогрунт с *0–5 % эрозии анализируемой площади* (приближено к классификациям «почвы с морфологически не измененным профилем, но новыми химическими свойствами» и «нарушенные естественно-восстанавливаемые»). Относится к наиболее отдаленным от дорожного полотна секторам 3 («Насыпь») и «Нулевое положение») и 4 («Выемка»). В основном сохраняется дерново-подзолистый тип почв. Отсутствуют явные механические повреждения вследствие кошения, на глубине 10–20 см встречаются элементы строительного песка, ценофлора достаточно замкнута, вклад видов-индикаторов антропогенного воздействия минимален.

2. Почвогрунт с *6–15 % эрозии анализируемой площади* (приближено к классификациям «почвы с измененными и/или перемешанными верхними горизонтами» и «нарушенные естественно-восстанавливаемые / деградированные»). Характерны для участков в результате смыва почвогрунта с вышерасположенных секторов полосы отвода (сектор 2 в «Выемке» и «Нулевом положении», сектор 3 в «Насыпи») с включением разрушенных элементов дорожного покрытия, разметки, строительного и бытового мусора. Имеет признаки «урбанозема» [16; 26]. Нижний горизонт (10–20 см) – строительный песок. Территория минимально представлена сохранившимися естественными почвами с высокой долей привозного почвогрунта.

3. Почвогрунт с *16–30 % эрозии анализируемой площади* (приближено к классификациям «почвы с новыми, сходными естественному или искусственному горизонтам в составе единого профиля» и «деградированные / деградированные эрозионные»). Верхний горизонт 0–10 см представлен частично размытым деградированным привозным почвогрунтом с элементами песка, нижний горизонт 10–20 см – строительный песок с гравием. Местами эрозия достаточно выражена вследствие смыва почвогрунта или механического повреждения из-за кошения.

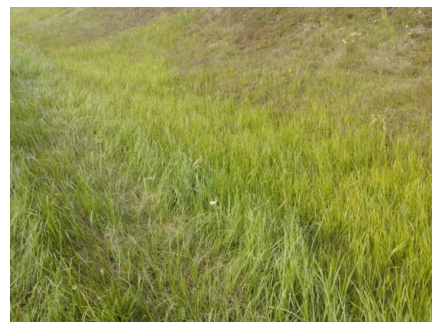
4. Почвогрунт с *31–75 % эрозии анализируемой площади* (приближено к классификациям «почвы с заново созданной системой горизонтов (антропогенный тип почв)» и «деградированные эрозионные»). Выраженное уплотнение, перегрев и эрозия почв (сектора 1 всех экспозиций). Мощность верхнего горизонта местами не достигает 5–10 см, представляя собой смесь мелкодисперсного песка и частиц сохранившегося

<sup>7</sup>ТКП 302-2018 (33520). Кадастровая оценка сельскохозяйственных земель. Технология работ. Взамен ТКП 302-2011 (03150). Минск: Госкомимущество, 2018. 104 с.

почвогрунта; нижний горизонт представлен песком с гравием. Растительность испытывает высокое антропогенное воздействие и представлена видами, устойчивыми к антропогенному прессу.

Согласно предложенной классификации нарушенности почвогрунтов, для 9 ЭФП проведен анализ между степенью эрозии почв и интенсивностью движения автотранспорта (табл. 1).

Корреляционный анализ зависимости между средним баллом эрозии почв для 9 ЭФП и средней интенсивностью движения автотранспорта показал статистически значимую динамику ( $r = 0,8$  при  $p < 0,05$ ) повышения эрозии почв в полосе отвода при увеличении количества автотранспортного потока.



Почвогрунт с 0–5 % эрозии анализируемой площади (1 балл)



Почвогрунт с 6–15 % эрозии анализируемой площади (2 балла)



Почвогрунт с 16–30 % эрозии анализируемой площади (3 балла)



Почвогрунт с 31–75 % эрозии анализируемой площади (4 балла)

Рис. 3. Классификация нарушенности почвогрунтов полосы отвода

Fig. 3. Classification of disturbance of the soil cover of the right-of-way

Таблица 1

Анализ почвогрунтов для 9 ЭФП по секторам

Table 1

Soil cover analysis for 9 EFPs by sector

| Название ЭФП – экспозиция          | Сектора экспозиции, балл |    |     |    | Средний балл эрозии почв в экспозиции | Средняя интенсивность движения автотранспорта, авт./сут. |
|------------------------------------|--------------------------|----|-----|----|---------------------------------------|----------------------------------------------------------|
|                                    | I                        | II | III | IV |                                       |                                                          |
| 1 – за МКАД2 – «Выемка»            | 3                        | 2  | 3   | 2  | 2,5                                   | 29122                                                    |
| 2 – за МКАД2 – «Насыпь»            | 3                        | 2  | 2   | –  | 2,3                                   | 29122                                                    |
| 3 – за МКАД2 – «Насыпь»            | 3                        | 3  | 2   | –  | 2,7                                   | 38036                                                    |
| 4 – за МКАД2 – «Нулевое положение» | 3                        | 2  | 1   | –  | 2,0                                   | 38036                                                    |
| 5 – за МКАД2 – «Выемка»            | 3                        | 2  | 3   | 2  | 2,5                                   | 13897                                                    |
| 6 – за МКАД2 – «Нулевое положение» | 3                        | 1  | 1   | –  | 1,7                                   | 13897                                                    |
| 7 – МКАД1 – «Насыпь»               | 4                        | 2  | 3   | –  | 3,0                                   | 84000                                                    |
| 8 – МКАД1 – «Выемка»               | 4                        | 2  | 3   | 3  | 3,0                                   | 84000                                                    |
| 9 – МКАД1 – «Нулевое положение»    | 4                        | 3  | 3   | –  | 3,3                                   | 84000                                                    |

Максимальная степень эрозии со средним баллом 2,7 отмечалась в «Выемке» и «Насыпи», в «Нулевом положении» средний балл составил 2,3 (табл. 1). Высокая эрозия почв прослеживается на откосах «Выемки», где был присвоен 3,0 балл для всех ЭФП. Разрушение почвогрунта на откосах «Насыпи» менее выражено и соответствует среднему баллу 2,3. Непосредственно примыкающий к дорожному полотну сектор 1 показал для всех экспозиций высокий средний балл 3,3, а в случае ЭФП вдоль МКАД-1 (М-9) средний балл составил 4,0. Частое накопление смываемого почвогрунта с откосов в кювет создает благоприятные условия для фитоценозов – в «Выемке» средний балл составил 2,0, что в 1,5 раза ниже соседних секторов.

Сравнение общей эрозии почв полосы отвода (средний балл) со средней интенсивностью движения автотранспорта показало высокий общий средний балл 3,1 для экспозиций вдоль МКАД-1 (М-9). ЭФП 1–4 показали общий средний балл 2,4, что свидетельствует об отсутствии вероятных различий между участками с интенсивностью движения около 30–40 тыс. авт./сут. Наименьшая интенсивность движения отмечена для 5 и 6 ЭФП, что составляет общий средний балл 2,1.

*Загрязненность полосы отвода солевыми компонентами ПГР. Ионы натрия ( $Na^+$ ).* Средняя концентрация ионов в летний период составила 127,56 мг/кг (15,22–298,62 мг/кг) и в весенний – 118,53 мг/кг (14,27–269,62 мг/кг), что означает интенсивный смыв солей весной с талыми водами и вторичного засоления в августе в результате выпарения растворов солей с нижних горизонтов (рис. 4, табл. 2, 3). Среднее содержание  $Na^+$  летом в верхнем горизонте (0–10 см) ниже на 5,73 мг/кг, чем в нижнем (10–20 см); весной тенденция обратная – в верхнем горизонте концентрация была выше на 57,12 мг/кг или в 1,6 раза, что характеризует временное накопление солевого раствора при таянии снега и льда.

В «Выемке» отмечается снижение концентрации  $Na^+$  по мере удаления от дорожного полотна в летний ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ) и весенний периоды ( $r = 0,8$  при  $p < 0,05$ ) без явных признаков накопления в кюветах. В «Насыпи» статистически значимый рост  $Na^+$  во всех горизонтах по мере удаления от дорожного полотна наблюдался только летом ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ). Накопление ионов в «Насыпи», обратное «Выемке», вызвано аккумуляцией солей в кюветах (сектор 3) в отличие от более равномерного распределения натрия в полосе отвода «Выемки». В «Нулевом положении» динамика схожа с «Выемкой» – содержание ионов снижается в горизонтах по мере удаления от дорожного полотна с выраженным накоплением в слабо сохранившихся кюветах (сектор 2) летом ( $r = 0,8$  при  $p < 0,05$ ) и весной ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ).

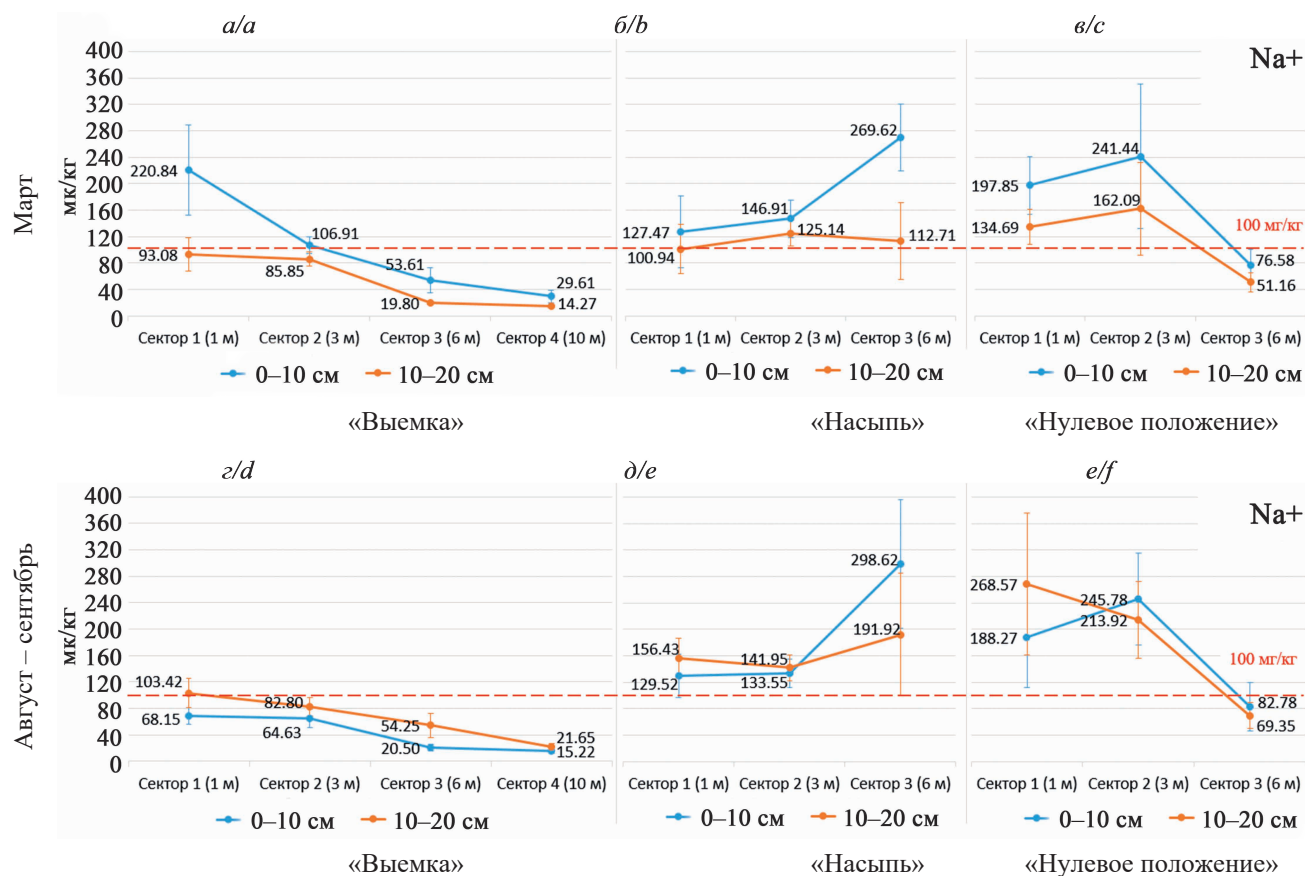


Рис. 4. Концентрация ионов натрия по секторам экспозиций и глубине отбора в летний (снизу) и весенний (сверху) периоды  
Fig. 4. Concentration of sodium ions by exposure sectors and sampling depth in summer (lower) and spring (higher) periods

Таблица 2

Показатели концентрации ионов Na<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup> в почве придорожных территорий и ее кислотности (pH) за весенний период отбора

Table 2

Indicators of the concentration of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> ions in the soil of roadside areas and its acidity (pH) during the spring sampling period

|      | Элемент /<br>показатель<br>(глубина), см | Экспозиция «Выемка», мг/кг |                    |                   |                    | Экспозиция «Насыпь», мг/кг |                    |                    | Экспозиция «Нулевое<br>положение», мг/кг |                     |                   |
|------|------------------------------------------|----------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------------|---------------------|-------------------|
|      |                                          | Сектор 1<br>(1 м)          | Сектор 2<br>(3 м)  | Сектор 3<br>(6 м) | Сектор 4<br>(10 м) | Сектор 1<br>(1 м)          | Сектор 2<br>(3 м)  | Сектор 3<br>(6 м)  | Сектор 1<br>(1 м)                        | Сектор 2<br>(3 м)   | Сектор 3<br>(6 м) |
| Март | Na <sup>+</sup> (0–10)                   | 220,84 ±<br>68,384         | 106,91 ±<br>12,430 | 53,61 ±<br>18,797 | 29,61 ±<br>9,483   | 127,47 ±<br>54,630         | 146,91 ±<br>28,306 | 269,62 ±<br>50,374 | 197,85 ±<br>43,589                       | 241,44 ±<br>109,526 | 76,58 ±<br>24,419 |
|      | Na <sup>+</sup> (10–20)                  | 93,08 ±<br>24,699          | 85,85 ±<br>10,522  | 19,80 ±<br>2,053  | 14,27 ±<br>1,994   | 100,94 ±<br>37,417         | 125,14 ±<br>19,643 | 112,71 ±<br>58,098 | 134,69 ±<br>26,666                       | 162,09 ±<br>70,401  | 51,16 ±<br>14,630 |
|      | Cl <sup>-</sup> (0–10)                   | 198,80 ±<br>122,602        | 54,90 ±<br>12,577  | 25,34 ±<br>3,156  | 22,54 ±<br>0,203   | 117,98 ±<br>38,055         | 66,31 ±<br>12,685  | 215,90 ±<br>63,547 | 43,02 ±<br>18,460                        | 158,41 ±<br>103,693 | 38,60 ±<br>14,693 |
|      | Cl <sup>-</sup> (10–20)                  | 29,30 ±<br>12,797          | 33,12 ±<br>7,185   | 26,25 ±<br>3,028  | 47,96 ±<br>20,937  | 60,71 ±<br>17,117          | 50,37 ±<br>10,163  | 90,65 ±<br>54,850  | 34,88 ±<br>10,651                        | 68,83±<br>39,170    | 24,36 ±<br>8,134  |
|      | pH (0–10)                                | 8,39 ±<br>0,318            | 8,16 ±<br>0,327    | 7,48 ±<br>0,166   | 6,89 ±<br>0,240    | 8,68 ±<br>0,305            | 8,31 ±<br>0,149    | 8,17 ±<br>0,207    | 9,09 ±<br>0,148                          | 8,44 ±<br>0,026     | 7,93 ±<br>0,282   |
|      | pH (10–20)                               | 8,17 ±<br>0,132            | 7,76 ±<br>0,130    | 7,68 ±<br>0,207   | 6,83 ±<br>0,418    | 8,20 ±<br>0,384            | 8,23 ±<br>0,259    | 7,83 ±<br>0,413    | 9,02 ±<br>0,069                          | 8,13 ±<br>0,140     | 7,93 ±<br>2,280   |
|      | ИСВ (0–10)                               | 3,20                       | 0,62               | 0,05              | 0,05               | 1,45                       | 1,13               | 3,86               | 1,41                                     | 3,00                | 0,15              |
|      | ИСВ (10–20)                              | 0,22                       | 0,19               | 0,05              | 0,05               | 0,62                       | 0,76               | 1,03               | 0,70                                     | 1,31                | 0,05              |

Таблица 3

Показатели концентрации ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  в почве придорожных территорий  
и ее кислотности (pH) за летний период отбора

Table 3

Indicators of the concentration of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  ions in the soil of roadside areas  
and its acidity (pH) during the summer sampling period

|                   | Элемент /<br>показатель<br>(глубина),<br>см | Экспозиция «Выемка», мг/кг |                   |                   |                    | Экспозиция «Насыпь», мг/кг |                    |                     | Экспозиция «Нулевое<br>положение», мг/кг |                    |                   |
|-------------------|---------------------------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|---------------------|------------------------------------------|--------------------|-------------------|
|                   |                                             | Сектор 1<br>(1 м)          | Сектор 2<br>(3 м) | Сектор 3<br>(6 м) | Сектор 4<br>(10 м) | Сектор 1<br>(1 м)          | Сектор 2<br>(3 м)  | Сектор 3<br>(6 м)   | Сектор 1<br>(1 м)                        | Сектор 2<br>(3 м)  | Сектор 3<br>(6 м) |
| Август – сентябрь | $\text{Na}^+$ (0–10)                        | 68,15 ±<br>12,605          | 64,63 ±<br>13,600 | 20,50 ±<br>4,696  | 15,22 ±<br>4,816   | 129,52 ±<br>32,550         | 133,55 ±<br>21,535 | 298,62 ±<br>97,482  | 188,27 ±<br>76,396                       | 245,75 ±<br>69,218 | 82,78 ±<br>36,918 |
|                   | $\text{Na}^+$ (10–20)                       | 103,42 ±<br>21,657         | 82,80 ±<br>13,529 | 54,25 ±<br>18,475 | 21,65 ±<br>5,081   | 156,43 ±<br>29,958         | 141,95 ±<br>19,649 | 191,92 ±<br>93,082  | 268,57 ±<br>107,843                      | 213,92 ±<br>58,242 | 69,35 ±<br>19,784 |
|                   | $\text{Cl}^-$ (0–10)                        | 48,18 ±<br>15,236          | 30,11 ±<br>7,861  | 24,82 ±<br>2,728  | 19,75 ±<br>5,706   | 26,81 ±<br>1,564           | 41,73 ±<br>8,012   | 322,61 ±<br>116,513 | 195,24 ±<br>136,066                      | 149,52 ±<br>88,832 | 26,11 ±<br>6,366  |
|                   | $\text{Cl}^-$ (10–20)                       | 69,80 ±<br>20,724          | 26,50 ±<br>6,176  | 16,51 ±<br>2,860  | 24,61 ±<br>6,905   | 33,45 ±<br>1,611           | 64,29 ±<br>11,369  | 251,77 ±<br>90,340  | 225,08 ±<br>159,039                      | 133,07 ±<br>84,926 | 28,83 ±<br>8,603  |
|                   | pH (0–10)                                   | 8,53 ±<br>0,319            | 8,33 ±<br>0,164   | 7,74 ±<br>0,255   | 7,16 ±<br>0,123    | 8,60 ±<br>0,040            | 8,46 ±<br>0,139    | 7,87 ±<br>0,133     | 8,41 ±<br>0,235                          | 8,32 ±<br>0,030    | 7,80 ±<br>0,003   |
|                   | pH (10–20)                                  | 9,13 ±<br>0,127            | 8,57 ±<br>0,128   | 8,02 ±<br>0,162   | 7,62 ±<br>0,162    | 8,49 ±<br>0,164            | 8,52 ±<br>0,090    | 8,19 ±<br>0,264     | 8,73 ±<br>0,244                          | 8,38 ±<br>0,148    | 7,86 ±<br>0,069   |
|                   | ИСВ (0–10)                                  | 0,16                       | 0,05              | 0,05              | 0,05               | 0,56                       | 0,75               | 5,21                | 2,84                                     | 2,95               | 0,09              |
|                   | ИСВ<br>(10–20)                              | 0,73                       | 0,05              | 0,05              | 0,05               | 0,90                       | 1,06               | 3,44                | 3,94                                     | 2,47               | 0,05              |

Средняя загрязненность по экспозициям автодорог в летний период следующая: «Нулевое положение» (178,11 мг/кг) > «Насыпь» (175,33 мг/кг) > «Выемка» (53,83 мг/кг); в весенний период: «Насыпь» (147,13 мг/кг) > «Нулевое положение» (143,97 мг/кг) > «Выемка» (78,00 мг/кг) (рис. 4). Средняя концентрация  $\text{Na}^+$  в «Выемке» была меньше других экспозиций в 3,3 раза летом и в 1,8–1,9 раза весной.

**Хлориды ( $\text{Cl}^-$ ).** Средняя концентрация хлоридов летом составила 87,94 мг/кг (16,51–322,61 мг/кг) и весной – 70,43 мг/кг (22,54–215,90 мг/кг), что характеризует ситуацию, схожую с  $\text{Na}^+$  (рис. 5, табл. 2, 3). Среднее содержание  $\text{Cl}^-$  за летний период в верхнем горизонте (0–10 см) меньше на 1,10 мг/кг, чем в нижнем (10–20 см); весной тенденция обратная – в верхнем горизонте концентрация была выше на 47,54 мг/кг или в 2,0 раза. Как и в случае с  $\text{Na}^+$ , отмечаются слабые различия концентрации солей между горизонтами летом.

Летом в «Выемке» содержание  $\text{Cl}^-$  достаточно равномерное между секторами полосы отвода, но сохраняется снижение концентрации по мере удаления от дорожного полотна ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ); в весенний период наблюдается обратная динамика между почвенными горизонтами – в верхнем горизонте (0–10 см) концентрация снижается в 8,9 раз, а в нижнем (10–20 см) – увеличивается по мере удаления от дорожного полотна в 1,6 раза ( $r = -0,4$  при  $p < 0,05$ ). В «Насыпи» отмечался рост концентрации по мере удаления от дорожного полотна ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ) за весь период наблюдений. В «нулевом положении» содержание хлоридов снижалось в горизонтах по мере удаления от дорожного полотна ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ) летом, а весной – концентрация была довольно равномерной вдоль всей полосы отвода с резким увеличением в кюветах ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ) в пределах верхнего горизонта в 3,7–4,1 раза и нижнего – в 2,0–2,8 раза.

Средняя загрязненность по экспозициям автодорог в летний период следующая: «Нулевое положение» (126,31 мг/кг) > «Насыпь» (123,44 мг/кг) > «Выемка» (32,54 мг/кг); в весенний период: «Насыпь» (100,32 мг/кг) > «Нулевое положение» (61,35 мг/кг) > «Выемка» (54,78 мг/кг) (рис. 5). В соответствии с концентрацией  $\text{Na}^+$ , содержание хлоридов в «Выемке» было меньше других экспозиций в 3,8–3,9 раза летом; в весенний период в «насыпи» концентрация  $\text{Cl}^-$  была выше остальных экспозиций в 1,6–1,8 раза.

**Водородный показатель (pH).** Средний показатель кислотности (pH) летом составил 8,24 (7,16–9,13) и весной – 8,07 (6,83–9,09), что подтверждает высокое и постоянное засоление придорожных почв в течение сезона, сопровождающееся ее подщелачиванием (рис. 6, табл. 2, 3). Средний показатель pH летом в верхнем горизонте (0–10 см) (8,12) меньше, чем в нижнем (10–20 см) (8,35) из-за преимущественного смыва солей за летний период; весной почва в верхнем горизонте была с более щелочной реакцией (8,15), чем летом – 7,98. Для всех экспозиций характерна общая тенденция снижения pH по мере удаления от дорожного полотна ( $r = 0,9$  при  $p < 0,05$ ); для «насыпи» в весенний период  $r = 0,7$  при  $p < 0,05$ .

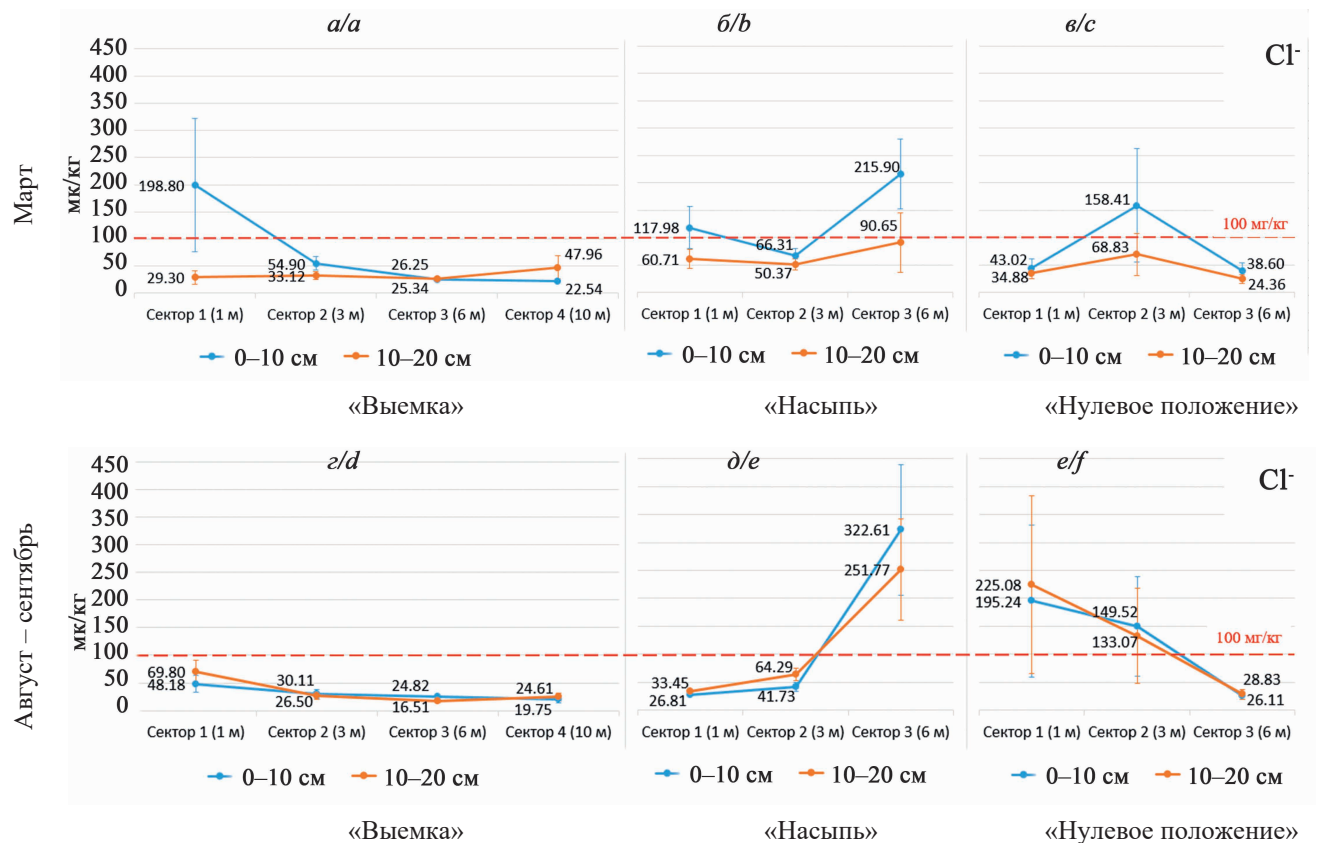


Рис. 5. Концентрация хлоридов по секторам экспозиций и глубине отбора в летний (снизу) и весенний (сверху) периоды

Fig. 5. Concentration of chlorides by exposure sectors and sampling depth in summer (lower) and spring (higher) periods

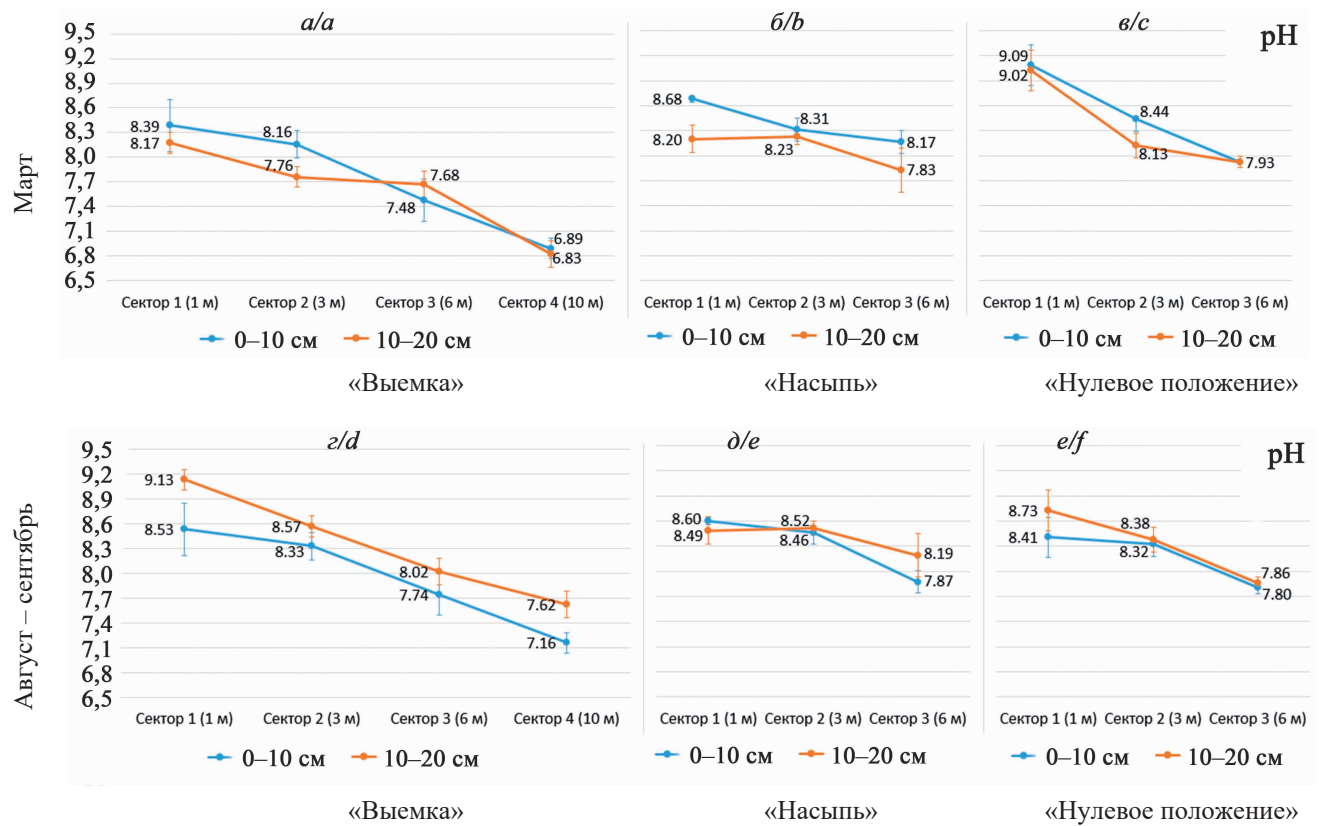


Рис. 6. Показатели кислотности (pH) по секторам экспозиций и глубине отбора в летний (снизу) и весенний (сверху) периоды

Fig. 6. Acidity indicators (pH) by exposure sectors and sampling depth in summer (lower) and spring (higher) periods

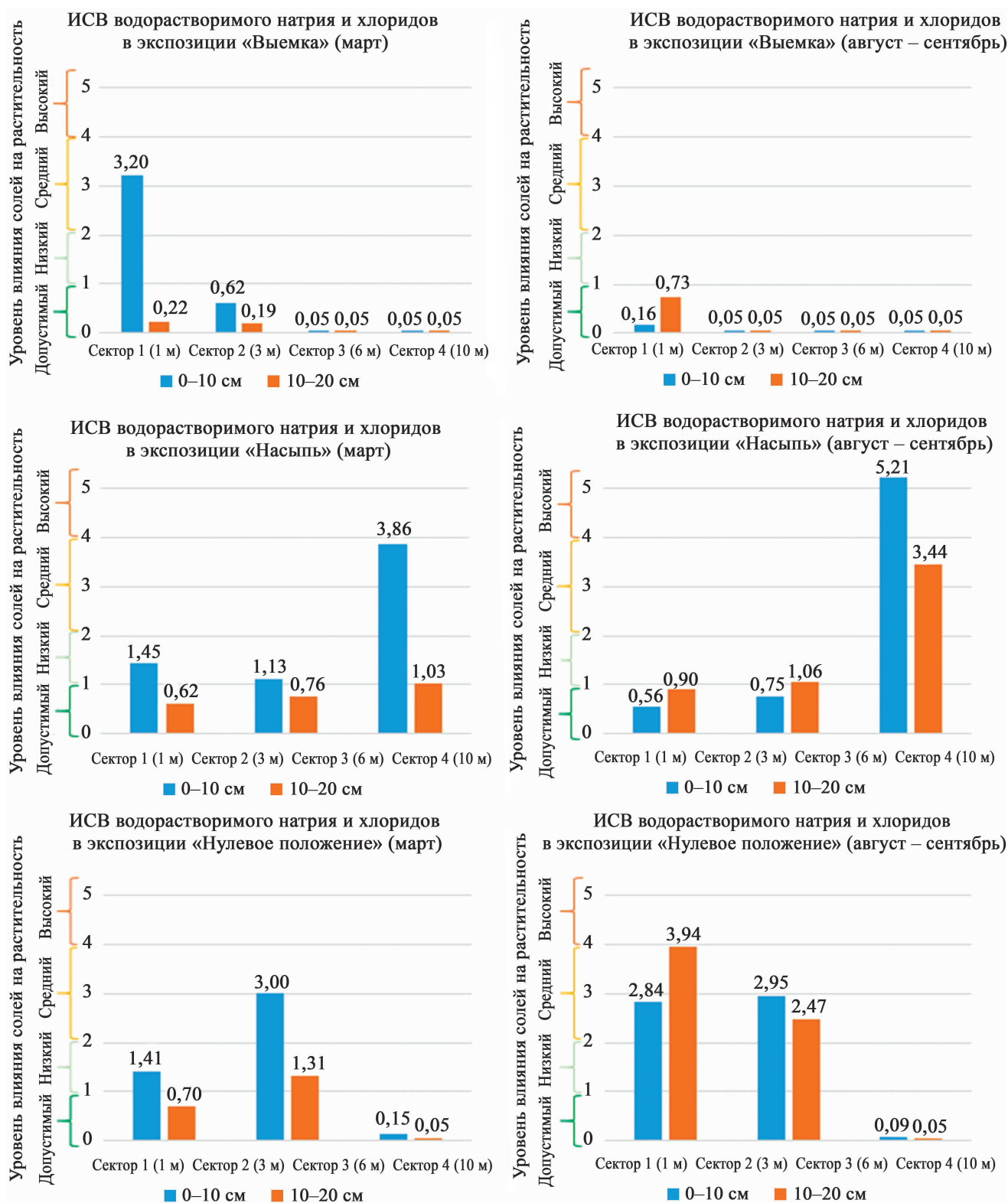


Рис. 7. Интенсивность солевого воздействия (ИСВ)  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  на придорожную растительность в зависимости от экспозиции полосы отвода и периода отбора почв

Fig. 7. Intensity of salt impact of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Cl}^-$  on roadside vegetation depending on the exposure of the right-of-way and the period of soil sampling

Средний показатель pH по экспозициям автодорог в летний период следующий: «Насыпь» (8,36) > «Нулевое положение» (8,25) > «Выемка» (8,14); в весенний период: «Нулевое положение» (8,42) > «Насыпь» (8,24) > «Выемка» (7,67) (рис. 6). Отмечается статистически значимая положительная корреляция между pH и засолением почв ( $r = 0,7$  при  $p < 0,05$ ).

В большинстве случаев отмечаются признаки миграции солевых растворов между горизонтами – в летний период содержание ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  в отличие от весеннего в верхнем горизонте (0–10 см) было меньше, чем в нижнем (10–20 см). Однако в летнем периоде сохраняются высокие показатели в нижнем горизонте (10–20 см), близкие к верхнему (0–10 см) из-за капиллярного подъема минерализованных растворов к поверхностному слою [3]. Данные результаты подтверждаются схожей динамикой подщелачивания почвенных горизонтов ( $r = 0,7$  при  $p < 0,05$ ).

Интенсивность солевого воздействия (ИСВ). ИСВ позволяет предположить уровень комплексного воздействия солевых компонентов ПГР (ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ ) на растительность.

В «Выемке» в весенний период начала вегетации растений отмечается превышение уровня влияния солей в горизонте 0–10 см над горизонтом 10–20 см в 7,54 раза: в секторе 1 средний уровень (3,20) влияния засоления в горизонте 0–10 см превышал допустимый уровень (0,22) (горизонт 10–20 см) в 14,55 раза, в остальных секторах ИСВ находился в пределах допустимого (рис. 7, табл. 2). Летом (август–сентябрь) эффект от засоления сохранялся в пределах допустимого уровня, при этом в секторе 1 в нижнем горизонте (10–20 см) ИСВ был выше в 4,56 раза по сравнению с верхним горизонтом (0–10 см) (табл. 3). На откосах и вершинах насыпей в «Выемке» ИСВ остается на уровне допустимого благодаря постоянному смыву солей и преимущественного засоления секторов 1 и 2.

Весной в «Насыпи» уровень ИСВ верхнего горизонта (0–10 см) выше нижнего (10–20 см) в 2,69 раза; условия секторов 1 и 2 соответствуют низкому уровню влияния солей для почв на глубине 0–10 см со снижением по мере удаления от дорожного полотна, в нижних слоях почвогрунта (10–20 см) сохраняется допустимый уровень ИСВ (рис. 7, табл. 2). Весной в секторе 3 за счет смыва и таяния снега эффект накопления солей приводит к становлению среднего уровня ИСВ на глубине 0–10 см. В летний период наблюдения уровень солевого воздействия в секторах 1 и 2 снижается до допустимого-низкого; в 3-ем секторе за счет интенсивного выпарения солевых растворов из нижних горизонтов на глубине 0–10 см отмечается высокий (5,21) уровень ИСВ, что выше нижнего горизонта (10–20 см) в 1,51 раза – в нижнем горизонте средний уровень ИСВ (3,44) (табл. 3).

«Нулевое положение» характеризуется допустимым-низким уровнем ИСВ в секторе 1 весной с ростом до среднего уровня летом – в 3,23 раза, при этом в летний период ИСВ на глубине почвы 10–20 см было выше верхнего горизонта (0–10 см) в 1,39 раза (рис. 7, табл. 2). Весной в слабовыраженных кюветах (сектор 2) ИСВ на глубине 0–10 см достигает среднего уровня (3,00), оставаясь в пределах схожего уровня летом – средний (2,95). Средний уровень ИСВ (2,47–3,94) в летний период, вероятно, связан с конструкцией полосы отвода, где соли накапливаются равномерно в секторах 1 и 2, сохраняя сильное негативное воздействие в течение всего сезона вегетации.

*Структура придорожных фитоценозов.* По синтаксономической структуре придорожная растительность представлена 3 классами, 4 порядками, 5 союзами, 11 ассоциациями и 2 безранговыми сообществами.

#### **Продромус придорожной травянистой растительности**

Класс *Polygono-Poetea annuae* Rivas-Martínez 1975

Порядок *Polygono arenastri-Poëtalina annuae* R. Tx. in Géhu et al. 1972 corr. Rivas-Martínez et al. 1991

Союз *Polygono-Coronopodion* Sissingh 1969

Acc. *Polygonetum arenastri* Gams 1927 corr. Lanikova in Chytry 2009

Вар.: *typica*; *Potentilla anserina*; *Poa compressa*

Класс *Artemisietea vulgaris* Lohmeyer et al. in Tx. ex von Rochow 1951

Порядок *Agropyretalia intermedio-repentis* T. Müller et Görs 1969

Союз *Convolvulo arvensis-Agropyron repentis* Görs 1967

Acc. *Arrhenathero elatioris-Dactylidetum glomeratae* Arepieva 2015

Вар.: *typica*; *Lupinus polyphyllus*

Acc. *Convolvulo arvensis-Elytrigietum repentis* Felföldy 1943

Вар.: *typica*; *Lolium perenne*

Acc. *Convolvulo arvensis-Brometum inermis* Felföldy 1943

Acc. *Calamagrostidetum epigeios* Kostiljov in V. Solomakha et al. 1992

Вар.: *Dactylis glomerata*; *Lolium perenne*; *Solidago canadensis*

Сообщество *Calamagrostis epigeios* [*Agropyretalia intermedio-repentis* / *Koelerio-Corynephoretea canescentis*]

Сообщество *Pilosella officinarum-Bromopsis inermis* [*Agropyretalia intermedio-repentis* / *Koelerio-Corynephoretea canescentis*]

Класс *Molinio-Arrhenatheretea* Tx. 1937

Порядок *Potentillo-Polygonetalia avicularis* Tx. 1947

Союз *Potentillion anserinae* Tx. 1947

Асс. *Lolio-Potentilletum anserinae* (Knapp 1946) Tx. 1947

Порядок *Arrhenatheretalia* R. Tx. 1931

Союз *Arrhenatherion elatioris* Luquet 1926

Асс. *Festucetum rubrae* (Domin 1923) Válek 1956 em. Pukau et al. 1956

Асс. *Dactylido glomeratae-Bromopsietum inermis* Sapegin et Dajneko 2008

Вар.: *typica*; *Phragmites australis*; *Calamagrostis epigeios*; *Lupinus polyphyllus*; *Solidago canadensis*; *Cirsium arvense*; *Phalaroides arundinacea*

Асс. *Festucetum pratensis-Dactylidetum glomeratae* Dymina 1989

Вар.: *typica*; *Calamagrostis epigeios*

Союз *Cynosurion cristati* Tx. 1947

Асс. *Leontodonto-Poetum pratensis* Anishchenko et Ishbirdina in Ishbirdina et al. 1989 ex Anishchenko et al.

Асс. *Lolietum perennis* Gams 1927

На нарушенных участках полосы отвода с преимущественно высокими показателями засоления отмечаются синантропные (классы *Polygono-Poetea annuae* и *Artemisietea vulgaris*) сообщества, участки с меньшим антропогенным воздействием занимают луговые (класс *Molinio-Arrhenatheretea*) сообщества высокой степени трансформации.

Асс. *Polygonetum arenastrum* встречается исключительно вдоль секторов 1 всех экспозиций. Отмечается в условиях засоления почв водорастворимым натрием – 68,15–268,57 мг/кг и хлоридами – 26,81–225,08 мг/кг. Для фитоценозов характерен 3 и 4 баллы эрозии почв. В сообществах доминируют виды: *Poa annua*, *Polygonum arenastrum*, *Potentilla anserina*, *Plantago major*, *Poa compressa* и др.

Асс. *Arrhenathero elatioris-Dactylidetum glomeratae* характерна для секторов 2 и 3 «Насыпей» с 1 баллом эрозии почв. Условия засоления для данного сообщества не оценивались по причине его нахождения вдоль участков автодороги Р-65 с наименьшей интенсивностью автотранспортного потока. Характерны виды: *Arrhenatherum elatius*, *Dactylis glomerata*, *Trifolium pratense*, *Festuca pratensis*, *Lolium perenne* и др.

Асс. *Convolvulo arvensis-Elytrigietum repens* и асс. *Convolvulo arvensis-Brometum inermis* встречаются в секторах 1 и 2 всех экспозиций с 1 и 2 баллом эрозии почв. Условия засоления почв водорастворимым натрием – 64,63–268,57 мг/кг и хлоридами – 26,50–225,08 мг/кг. Доминируют виды: *Bromopsis inermis*, *Convolvulus arvensis*, *Dactylis glomerata*, *Elytrigia repens*, *Lolium perenne* и др.

Асс. *Calamagrostidetum epigeios* достаточно динамична, что сказывается на разнообразии вариантов ассоциации (2–4 балла деградации почв) и расположении вдоль всех участков полосы отвода. Сообщество способно выдерживать условия засоления в пределах установленного максимума: для водорастворимого натрия – 298,62 мг/кг и хлоридов – 322,61 мг/кг. Характерны виды: *Calamagrostis epigeios*, *Dactylis glomerata*, *Lolium perenne*, *Solidago canadensis* и др.

Безранговые сообщества *Calamagrostis epigeios* и *Pilosella officinarum-Bromopsis inermis* [*Agropyretalia intermedio-repentis* / *Koelerio-Corynephoretea canescentis*] встречаются исключительно на откосах «Выемок» (сектор 3) с 4 баллом эрозии почв. Содержание водорастворимого натрия – 19,80–54,25 мг/кг и хлоридов – 16,51–26,25 мг/кг в почве указывает на второстепенное влияние фактора засоления на формирование сообществ в условиях сильной эрозии почвенного покрова. Доминируют виды: *Bromopsis inermis*, *Calamagrostis epigeios*, *Conyza canadensis*, *Lolium perenne*, *Pilosella officinarum* и др.

Асс. *Lolio-Potentilletum anserinae* и асс. *Lolietum perennis* характерны для участков полосы отвода с сильной эрозией и частым уплотнением почв – 1 сектора всех экспозиций с 3–4 баллом эрозии почв. Засоление водорастворимым натрием – 68,15–268,57 мг/кг и хлоридами – 26,81–225,08 мг/кг. Доминируют виды *Dactylis glomerata*, *Festuca rubra*, *Leontodon autumnalis*, *Lolium perenne*, *Potentilla anserina* и др.

Асс. *Festucetum rubrae* отмечается вдоль всей полосы отвода на участках со сформированной плотной дерниной – 1–2 балл эрозии почв и засолением водорастворимым натрием – до 298,62 мг/кг и хлоридами – до 322,61 мг/кг. Преобладают виды *Bromopsis inermis*, *Dactylis glomerata*, *Festuca pratensis*, *Festuca rubra*, *Lolium perenne* и др.

Асс. *Dactylido glomeratae-Bromopsietum inermis* также как асс. *Calamagrostidetum epigeios* характеризуется динамичностью флористического состава и структурой фитоценозов, но в отличие от сообществ вейника наземного обладает необходимыми критериями придорожного газона. Встречается вдоль всех участков полосы отвода, кроме примыкающих к дорожному полотну – сектора 1 всех экспозиций;

1–3 балл эрозии почв. Условия засоления: водорастворимый натрий – 14,27–298,62 мг/кг и хлоридами – 16,51–322,61 мг/кг. Доминируют виды *Bromopsis inermis*, *Calamagrostis epigeios*, *Dactylis glomerata*, *Lolium perenne*, *Solidago canadensis* и др.

Асс. *Festucetum pratensis*-*Dactylidetum glomeratae* и *Leontodonto-Poetum pratensis* характерны для наиболее отдаленных от дорожного полотна участков полосы отвода – 3 сектора «Насыпи» и «Нулевого положения» и 4 сектор «Выемки» с частым примыканием к пешеходным дорожкам. 1–2 балл эрозии почв. Анализ засоления вдоль участков полосы отвода с данным фитоценозами не проводился. Характерны виды *Calamagrostis epigeios*, *Dactylis glomerata*, *Festuca pratensis*, *Leontodon autumnalis*, *Poa pratensis* и др.

Для сохранения придорожного газона (в пределах полосы отвода вдоль автомобильных дорог) в условиях интенсивного засоления и эрозии придорожных почвогрунтов рекомендуется:

1) использовать в качестве придорожных травосмесей семена длиннокорневищных (*Bromopsis inermis*, *Elytrigia repens*) и рыхлодерновинных (*Dactylis glomerata*, *Festuca pratensis*, *Festuca rubra*, *Lolium perenne*, *Poa pratensis*) злаков, устойчивых к современным условиям комплексного антропогенного воздействия вдоль автодорог. Дополнительно участки с высокой эрозией почв (4 балл) засеивать семенами *Calamagrostis epigeios*;

2) систематически обновлять газон путем подсеивания семян из рекомендуемых видов и подсыпать почвогрунт, особенно на участках с высокой периодичностью кошения (5 и более раз за сезон) с целью снижения эрозионных процессов и предотвращения формирования сообществ сорной растительности, в том числе с высоким обилием инвазивных и склонных к инвазивности видов (*Conyza canadensis* и др.);

3) проводить мониторинг уровня загрязненности почв обменным натрием ( $\text{Na}^+$ ) и показателя кислотности (рН). При превышении допустимых норм 100 мг/кг  $\text{Na}^+$  и  $\text{pH} > 8,0$  применять гипсование, сульфат аммония или сульфат магния из расчета 0,3 кг/м<sup>2</sup> с целью предотвращения выщелачивания почв и повышения устойчивости придорожного газона [3; 5].

### Заключение

Показатели степени эрозии почв и засоления почвенного покрова в результате использования солевых противогололедных реагентов с преимущественным загрязнением верхних горизонтов (0–10 см) зависят от расстояния до дорожного полотна и с учетом конструкций полосы отвода (кюветы и откосы). Сектора 1 всех экспозиций показали наибольшие признаки эрозии почв – 3,0–4,0 балл, что также связано с высоким засолением. Исключения по высокой эрозии почв отмечались на откосах «Выемок» (3,0 балл) из-за частой периодичности в кошении, механическом повреждении почвенного покрова на откосах и его смыве атмосферными осадками. В «Нулевых положениях» отмечается наименьший средний балл 2,3, в «Выемках» и «Насыпях» – 2,7. В полосе отвода вдоль МКАД-1 (М-9), как наиболее нагруженных автодорогах, отмечается высокий средний балл 3,1 в отличие от остальных исследуемых участков за пределами МКАД-2 – средний балл 2,1.

Внутрисезонная динамика солевого загрязнения показала преимущественное засоление нижних горизонтов (10–20 см) в летний период из-за смыва солевого раствора атмосферными осадками в течение сезона вегетации. Высокое содержание ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  в верхнем горизонте (0–10 см) весной вызвано таянием снега с высоким содержанием солевых компонентов ПГР. Сохранение более высоких показателей засоления в летний период связано с капиллярным подъемом минерализованных растворов в результате накопления солей.

Выделенные придорожные фитоценозы в полосе отвода показывают устойчивость к сформировавшимся условиям произрастания в полосе отвода и вероятностную устойчивость к засолению в течение всего вегетативного сезона в результате внесения противогололедных реагентов в зимний период. Полученные данные загрязненности солями показывают возможность использования рекомендуемых видов в придорожных травосмесях благодаря их структурообразующей роли и доминированию в синтаксонах.

### Библиографические ссылки

- Харитонцев БС, Попова ЕИ. Особенности видового состава растительности придорожных фитоценозов. *Современные проблемы науки и образования*. 2017;5:1–8.
- Кавеленова ЛМ, Деменина ЛГ, Жавкина ТМ, Помогайбин АВ, Розно СА. Антропогенная трансформация среды и проблемы формирования культигенных ареалов растений. В: *Теоретические проблемы экологии и эволюции. Теория ареалов: виды, сообщества, экосистемы. V Любичевские чтения*. Тольятти: [б. и.]; 2010. с. 63–68.
- Судник АВ, Вознячук ИП. Последствия воздействия загрязнения придорожных территорий компонентами солевых реагентов на экологическое состояние почвы и растений в лесных биогеоценозах. *Лесной вестник*. 2020;24 (6):83–95.
- Илькун ГМ. *Загрязнители атмосферы и растения*. Киев: Наукова думка; 1978. 246 с.
- Судник АВ, Яковлев АП. *О последствиях применения в качестве противогололедного реагента хлорида натрия на состояние насаждений вдоль улиц и дорог в г. Минске*. В: *Актуальные проблемы изучения и сохранения фито- и микобиоты*. Минск: БГУ; 2021. с. 205–209.

6. Hofman J, Trávníčková E, Anděl P. Road salts effects on soil chemical and microbial properties at grassland and forest site in protected natural areas. *Plant, soil and environment*. 2012;58(6):282–288. DOI: <https://doi.org/10.17221/5994-PSE>.
7. Czerniawska-Kusza I, Kusza G, Duzynski M. Effect of deicing salts on urban soils and health status of roadside trees in the Opole region. *Environmental Toxicology*. 2004;19(4):296–301. DOI: <https://doi.org/10.1002/tox.20037>
8. Лысиков АБ. Влияние противогололедных реагентов на состояние почвы придорожных сосняков Серебряноборского опытного лесничества. *Лесоведение*. 2017; 6:446–451.
9. Сидорович ЕА, Арабей НМ, Кирковский КК. Аккумуляция ионов хлора почвами и ассимиляционными органами деревьев в городских насаждениях Минска. *Проблемы озеленения городов. Альманах*. 2004;10:203–207.
10. Головатый СЕ, Ковалевич ЗС, Лукашенко НК, Вишняков РВ. Пространственное распределение химических загрязнителей в почвах территорий, прилегающих к предприятиям ПО «Беларуськалий». Сообщение 2. Натрий. *Почвоведение и агрохимия*. 2008;2(41):244–255.
11. Кульбачевский АО, редактор. *О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2017 году. Доклад*. Москва: ДПиООС; 2018. 358 с.
12. Парфенов ВИ, редактор. *Определитель высших растений Беларуси*. Минск: Дизайн ПРО; 1999. 472 с.
13. Цвелев НН. *Определитель сосудистых растений Северо-Западной России (Ленинградская, Псковская и Новгородская области)*. Санкт-Петербург: Издательство СПФХА; 2000. 781 с.
14. Миркин БМ, Наумова ЛГ. История и концептуальные установки классификации растительных сообществ с использованием подхода Браун-Бланке. *Lethaea rossica*. 2014;9:21–34.
15. Герасимова МИ. *Антропогенные почвы: генезис, география, рекультивация*. Москва: Ойкумена; 2003. 270 с.
16. Баканина ФМ. Техногенные изменения почвенного покрова городских территорий (на примере города Горького). *Антропогенные изменения и охрана природной среды*. Н. Новгород: Издательство НГПУ; 1990. с. 61–66.
17. Лысиков АБ. Оценка состояния лесных почв, находящихся под воздействием московской кольцевой автодороги. В: *Почвы. Национальное достояние России. Материалы IV съезда Докучаевского общества почвоведов*. Новосибирск: «Наука-Центр»; 2004. 345 с.
18. Павлов ПД, Решетников МВ, Еремин ВН. Состояние почвенного покрова в зоне влияния полигона твердых бытовых отходов (на примере Александровского полигона г. Саратова). *Аграрный научный журнал*. 2014;11:34–38.
19. Жесткова ДБ. *Состав и структура травянистого покрова придорожных территорий автомагистралей крупного промышленного города* [автореферат диссертации]. Н. Новгород: [б. и.]; 2016. 167 с.

## References

1. Kharitontsev BS, Popova EI. *Osobennosti vidovogo sostava rastitel'nosti pridorozhnykh fitotsenozov* [Features of the species composition of vegetation of roadside phytocenoses]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2017; 5:1–8. Russian.
2. Kavelenova LM, Demenina LG, Zhavkina TM, Pomogaibin AV, Rozno SA. *Antropogennaya transformatsiya sredy i problemy formirovaniya kul'tigennykh arealov rastenij* [Anthropogenic transformation of the environment and problems of formation of cultigenic plant habitats]. In: *Theoretical problems of ecology and evolution. Theory of habitats: species, communities, ecosystems*. V Lyubishchev readings. Toliatti: [publisher unknown]; 2010. p. 63–68. Russian.
3. Sudnik AV, Voznyachuk IP. *Posledstviya vozdeistviya zagryazneniya pridorozhnykh territorii komponentami solevykh reagentov na ekologicheskoe sostoyanie pochvy i rastenij v lesnykh biogeotsenozakh* [Consequences of the impact of contamination of roadside areas with components of salt reagents on the ecological state of soil and plants in forest biogeocenoses]. *Lesnoj vestnik* [Forestry Bulletin]. 2020; 24 (6): 83–95. Russian.
4. Ilkun GM. *Zagryazniteli atmosfery i rasteniya* [Air pollutants and plants]. Kyiv: Naukova Dumka; 1978. 246 p. Russian.
5. Sudnik AV, Yakovlev AP. *O posledstviyakh primeneniya v kachestve protivogolodnogo reagenta khlorida natriya na sostoyanie nasazhdenij vdol' ulits i dorog v g. Minske* [On the consequences of using sodium chloride as a deicing agent on the condition of plantings along streets and roads in Minsk]. In: *Aktual'nye problemy izucheniya i sohraneniya fito- i mikrobioty* [Current problems in the study and conservation of phyto- and microbiota]. Minsk: BSU. 2021. 205–209. Russian.
6. Hofman J, Trávníčková E, Anděl P. Road salts effects on soil chemical and microbial properties at grassland and forest site in protected natural areas. *Plant, soil and environment*. 2012; 58(6):282–288. DOI: <https://doi.org/10.17221/5994-PSE>
7. Czerniawska-Kusza I, Kusza G, Duzynski M. Effect of deicing salts on urban soils and health status of roadside trees in the Opole region. *Environmental Toxicology*. 2004;19(4):296–301. DOI: <https://doi.org/10.1002/tox.20037>
8. Lysikov AB. *Vliyanie protivogolodnykh reagentov na sostoyanie pochvy pridorozhnykh sosnyakov Serebryanoborskogo opytnogo lesnichestva* [The influence of de-icing reagents on the condition of the soil in roadside pine forests of the Serebryanoborsky experimental forestry]. *Lesovedenie* [Forestry]. 2017; 6:446–451. Russian.
9. Sidorovich EA, Arabey NM, Kirkovsky KK. *Akkumulyatsiya ionov hlora pochvami i assilyacionnymi organami derev'ev v gorodskikh nasazhdeniyah Minska* [Accumulation of chlorine ions by soils and assimilation organs of trees in urban plantings of Minsk]. *Problemy ozeleneniya gorodov*. 2004;10:203–207. Russian.
10. Golovaty SE, Kovalevich ZS, Lukashenko NK, Vishnyakov RV. *Prostranstvennoe raspredelenie khimicheskikh zagryaznitelei v pochvakh territorii, prilegayushchikh k predpriyatiyam PO «Belarus'kali»*. *Soobshchenie 2. Natrii* [Spatial distribution of chemical pollutants in the soils of areas adjacent to the enterprises of the Belaruskali Production Association. Message 2. Sodium]. *Pochvovedenie i agrokhimiya* [Soil science and agrochemistry]. 2008;2(41):244–255. Russian.
11. Kulbachevsky AO, editor. *O sostoyanii okruzhayushchej sredy v gorode Moskve v 2017 godu. Doklad* [On the state of the environment in the city of Moscow in 2017. Report]. Moscow: DPiOOS; 2018. 358 p. Russian.
12. Parfenov VI, editor. *Opredelitel' vysshih rastenij Belarusi* [Key to higher plants of Belarus]. Minsk: Design PRO; 1999. 472 p. Russian.
13. Tsvelev NN. *Opredelitel' sosudistyh rastenij Severo-Zapadnoj Rossii (Leningradskaya, Pskovskaya i Novgorodskaya oblasti)* [Key to vascular plants of North-Western Russia (Leningrad, Pskov and Novgorod regions)]. Saint Petersburg: Izdatel'stvo SPFHA; 2000. 781 p. Russian.

14. Mirkin BM, Naumova LG. Istoriya i kontseptual'nye ustanovki klassifikatsii rastitel'nykh soobshchestv s ispol'zovaniem podkhoda Braun-Blanke. *Lethaea rossica* [History and conceptual guidelines for classifying plant communities using the Braun-Blanquet approach]. *Lethaea rossica*. 2014; 9:21–34. Russian.

15. Gerasimova MI. *Antropogennye pochvy: genezis, geografiya, rekul'tivaciya*. [Anthropogenic soils: genesis, geography, reclamation]. Moscow: Ojkumena; 2003. 270 p. Russian.

16. Bakanina FM. *Tekhnogennye izmeneniya pochvennogo pokrova gorodskikh territorii (na primere goroda Gor'kogo)* Antropogennye izmeneniya i okhrana prirodnoi sredy. [Technogenic changes in the soil cover of urban areas (using the example of the city of Gorky)]. Anthropogenic changes and environmental protection]. N. Novgorod: NSPU Publishing House; 1990. 61-66. Russian.

17. Lysikov AB. *Otsenka sostoyaniya lesnykh pochv, nakhodyashchikhsya pod vozdeistviem moskovskoi kol'tsevoi avtodorogi. Pochvy*. In: *Natsional'noe dostoyanie Rossii. Materialy IV s''ezda Dokuchaevskogo obshchestva pochvovedov* [Assessment of the condition of forest soils affected by the Moscow ring road. Soils. In: *National treasure of Russia. Materials of the IV Congress of the Dokuchaevsky Society of Soil Scientists*]. Novosibirsk: «Science-Center»; 2004. 345 p. Russian.

18. Pavlov PD, Reshetnikov MV, Eremin VN. *Sostoyanie pochvennogo pokrova v zone vliyaniya poligona tverdykh bytovykh otkhodov (na primere Aleksandrovskogo poligona g. Saratova)* [The state of the soil cover in the zone of influence of the solid waste landfill (using the example of the Aleksandrovsky landfill in Saratov)]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agricultural scientific journal]. 2014; 11:34–38.

19. Zhestkova DB. *Sostav i struktura travyanistogo pokrova pridorozhnykh territorij avtomagistralей крупного промышленного города* [Composition and structure of grass cover on roadside areas of highways in a large industrial city [PhD thesis]. N. Novgorod: [publisher unknown]; 2016. 167 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 20.06.2024.

Received by editorial board 20.06.2024.

## ВЛИЯНИЕ $\beta$ -1,3-ГЛЮКАНА НА ЗАЩИТНЫЕ РЕАКЦИИ РАСТЕНИЙ ТОМАТА ПРИ ФУЗАРИОЗНОМ УВЯДАНИИ

С. Н. ШПИЛЕВСКИЙ<sup>1)</sup>, И. Н. ДОМАНСКАЯ<sup>1)</sup>, В. И. ЛУКША<sup>1)</sup>, Л. Ф. КАБАШНИКОВА<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт биофизики и клеточной инженерии, Национальная академия наук Беларуси,  
ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Беларусь

К объективным причинам значительного снижения урожая культуры томата можно отнести заражение возбудителями грибных болезней. В этой связи изучение структурно-функциональных особенностей инфицированного растения представляет важный этап на пути выяснения механизмов устойчивости и создания системы эффективной защиты от болезней грибной этиологии. Изучено влияние препарата, включающего  $\beta$ -1,3-глюкан и водорастворимый полимер на основе сополимера акриламида с акрилатом натрия (ВРП), на развитие патогенного гриба *Fusarium oxysporum* sp. (*Fus. oxu.*) на твердой среде Чапека. В лабораторных условиях исследовано формирование защитных реакций, протекающих в листьях 60-дневных растений томата (*Lycopersicon esculentum* Mill., сорт Тамара) при искусственном фузариозном заражении. Оценка влияния  $\beta$ -1,3-глюкана и ВРП на рост грибного мицелия свидетельствует, что площадь колоний гриба увеличивается по отношению к контрольному варианту в 4,0 и 4,7 раза соответственно, следовательно, эти соединения не обладают антифунгальной активностью и, более того, стимулируют рост колоний гриба *in vitro*. Защитное действие препарата, содержащего  $\beta$ -1,3-глюкан и водорастворимый полимер, изучено путем предварительного опрыскивания растений томата, которые переносили из почвенной культуры на водопроводную воду и инфицировали спорами гриба *Fus. oxu.* через корневую систему. Обнаружено, что обработка растений томата  $\beta$ -1,3-глюканом индуцирует защитные реакции, которые характеризуются повышением содержания активных форм кислорода, полифенолов и антоцианов на фоне увеличения экспрессии генов PR-белков –  $\beta$ -1,3-глюканазы (*Glu*) и хитиназы (*Chi*) в листьях томата при инфицировании *Fus. oxu.* Количественный анализ содержания фотосинтетических пигментов показал, что патогенный гриб оказывает негативное действие на пигментный аппарат, снижая содержание хлорофиллов и каротиноидов в листьях томата, тогда как предварительная обработка растений препаратом, включающим  $\beta$ -1,3-глюкан и ВРП, способствует существенному увеличению содержания фотосинтетических пигментов. Полученные результаты создают научную основу для использования  $\beta$ -1,3-глюкана в овощеводстве для повышения болезнеустойчивости растений томата.

**Ключевые слова:** томаты; активные формы кислорода; полифенолы; хлорофилл; каротиноиды; хитиназа; глюканаза; *Fusarium oxysporum* sp.

**Благодарность.** Авторы выражают благодарность Ю. А. Сущевиц – кандидату сельскохозяйственных наук, заведующему лабораторией иммунитета Республиканского унитарного предприятия «Научно-практический центр земледелия Национальной академии наук Беларуси» за предоставленную культуру гриба *Fus. oxu.*, консультации по её выращиванию и процедуре инокуляции растений томата. Работа выполнена в рамках Государственной программы «Наукоемкие технологии и техника» на 2016–2020 годы.

### Образец цитирования:

Шпилевский СН, Доманская ИН, Лукша ВИ, Кабашикова ЛФ. Влияние  $\beta$ -1,3-глюкана на защитные реакции растений томата при фузариозном увядании. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;3:49–58.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-49-58>

### For citation:

Shpileuski SN, Domanskaya IN, Loucscha VI, Kabashnikova LF.  $\beta$ -1,3-glucan effect on the defence reaction of tomato leaves under fusarium wilt. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;3:49–58. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-49-58>

### Авторы:

**Святослав Николаевич Шпилевский** – научный сотрудник лаборатории прикладной биофизики и биохимии.

**Ирина Николаевна Доманская** – кандидат биологических наук, доцент; старший научный сотрудник лаборатории прикладной биофизики и биохимии.

**Виктория Ивановна Лукша** – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории прикладной биофизики и биохимии.

**Людмила Федоровна Кабашикова** – член-корреспондент НАН Беларуси; доктор биологических наук, доцент; заведующий лабораторией прикладной биофизики и биохимии.

### Authors:

**Sviataslau N. Shpileuski**, researcher at the laboratory for applied biophysics and biochemistry.

[metanova@mail.ru](mailto:metanova@mail.ru)

**Irina N. Domanskaya**, PhD (biology), docent; senior researcher at the laboratory for applied biophysics and biochemistry.

[domanin07@mail.ru](mailto:domanin07@mail.ru)

**Victoria I. Loucscha**, PhD (biology); senior researcher at the laboratory for applied biophysics and biochemistry.

[saphyjana2@gmail.com](mailto:saphyjana2@gmail.com)

**Liudmila F. Kabashnikova**, corresponding member of the National Academy of Sciences, Belarus; doctor of science (biology), professor; head of the laboratory for applied biophysics and biochemistry.

[kabashnikova@mail.ru](mailto:kabashnikova@mail.ru)

## B-1,3-GLUCAN EFFECT ON THE DEFENCE REACTION OF TOMATO LEAVES UNDER FUSARIUM WILT

S. N. SHPILEUSKI<sup>a</sup>, I. N. DOMANSKAYA<sup>a</sup>, V. I. LOUCSHA<sup>a</sup>, L. F. KABASHNIKOVA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Biophysics and Cell Engineering, National Academy of Sciences of Belarus,  
27 Akademichnaja Street, 27, Minsk 220072, Belarus*

*Corresponding author: Kabashnikova L. F. (kabashnikova@mail.ru)*

Objective reasons for a significant reduction in tomato crop yield include infection with pathogens of fungal diseases. In this regard, the study of the structural and functional characteristics of an infected plant represents an important step towards elucidating the mechanisms of resistance and creating a system of effective protection against diseases of fungal etiology. The effect of a drug containing  $\beta$ -1,3-glucan and a water-soluble polymer (WSP) based on a copolymer of acrylamide with sodium acrylate on the development of the pathogenic fungus *Fusarium oxysporum* sp. (*Fus. oxy.*) on solid Czapek medium was studied. The formation of protective reactions occurring in the leaves of 60-day-old tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill., variety Tamara) during artificial *Fusarium* infection was studied under laboratory conditions. An assessment of the effect of  $\beta$ -1,3-glucan and WSP on the growth of fungal mycelium showed that the area of fungal colonies increases relative to the control variant by 4.0 and 4.7 times, respectively, therefore these compounds do not have antifungal activity and, moreover, stimulate the growth of fungal colonies in vitro. The protective effect of a preparation containing  $\beta$ -1,3-glucan and WSP was studied by pre-spraying tomato plants that were transferred from soil culture to tap water and infected with spores of the fungus *Fus. oxy.* through the root system. It was found that treatment of tomato plants with  $\beta$ -1,3-glucan induces protective reactions, which are characterized by an increase in the content of reactive oxygen species, polyphenols and anthocyanins against the background of an increase in the expression of genes for PR proteins –  $\beta$ -1,3-glucanase (*Glu*) and chitinase (*Chi*) in tomato leaves during infection with *Fus. oxy.* Quantitative analysis of the content of photosynthetic pigments showed that the pathogenic fungus has a negative effect on the pigment apparatus, reducing the content of chlorophylls and carotenoids in tomato leaves, while pre-treatment of plants with a preparation including  $\beta$ -1,3-glucan and WSP contributes to a significant increase in the content of photosynthetic pigments. The results obtained provide a scientific basis for the use of  $\beta$ -1,3-glucan in crop production to improve the disease resistance of tomato plants.

**Keywords:** tomato; reactive oxygen species; polyphenols; chlorophyll; carotenoids; glucanase; chitinase; *Fusarium oxysporum* sp.

**Acknowledgements.** The authors thanks Sushchevich Yuliya, – PhD (agriculture), Head of the Immunity Laboratory, the Republican Unitary Enterprise «Research and Practical Centre for Arable Farming of the National Academy of Sciences of Belarus» for the fungus culture *Fus. oxy.* and consultation with respect to its cultivation and the tomato plant inoculation procedure. The work was funded by the State Program «High Technology and Technic» for 2016–2020.

### Введение

К объективным причинам значительного снижения урожая важнейших овощных культур можно отнести заражение возбудителями грибных болезней. Одной из первоочередных задач современной биологии является выявление путей формирования устойчивости растений к патогенным микроорганизмам. Установлено, что уровень устойчивости растений к фитозаболеваниям обеспечивается многими физиолого-биохимическими показателями, отвечающими за перестройку метаболизма растений и сохранение жизнеспособности в стрессовых условиях [1]. В этой связи изучение структурно-функциональных особенностей инфицированного растения представляет важный этап на пути познания природы их устойчивости к патогенным микроорганизмам и создания системы критериев оценки болезнеустойчивости.

Фузариозы – болезни множества культурных и дикорастущих растений, вызываемые несовершенными грибами рода *Fusarium*, выявляются во всех климатических зонах. На томатах и других пасленовых культурах фузариозное увядание широко распространено [2]. Комплекс мер борьбы с болезнями растений, наряду с использованием устойчивых сортов, включает ряд химических методов защиты [3]. Однако интенсивное применение пестицидов для подавления грибной инфекции приводит, с одной стороны, к химическому загрязнению экосистем, а с другой – к появлению высокорезистентных к пестицидам форм фитопатогенов.

В этой связи остро встает проблема поиска средств повышения общей неспецифической устойчивости растений (иммунного статуса) к неблагоприятным факторам биотической и абиотической природы путем индукции природных защитных механизмов. К препаратам нового поколения можно отнести глюканы, которые выполняют роль сигнальных молекул, обладают элиситорными свойствами и способны активировать гены устойчивости, приводящие к синтезу глюканаз и других фитоалексинов [4]. Классический элиситор гепта- $\beta$ -глюкозид, изолированный из клеточной стенки оомицетного гриба *Phytophthora sojae* f. sp. *Glycinea* (патогена сои), в диапазоне концентраций от  $10^{-8}$  до  $10^{-9}$ М индуцировал накопление

фитоалексинов в семядолях люцерны [5].  $\beta$ -глюкановый элиситор, изолированный из клеточных стенок мицелия гриба *Phytophthora colocasiae*, способен индуцировать устойчивость к увяданию листьев разных сортов колоказии при инфицировании этим патогеном [6].

Установлено, что  $\beta$ -1,3-глюканы вызывают целый спектр различных защитных реакций в растениях табака [7], арабидопсиса [8], риса [9], бобовых [10] и винограда [11]. Для винограда показано, что обработка листьев сульфатом  $\beta$ -1,3-глюкана запускает активацию сигнальных путей с участием ионов  $\text{Ca}^{2+}$ , накопление АФК, жасмоната и салицилата, МАРК-активность, индукцию хитиназ класса 3, глюконаз класса 2, белков, переносящих липиды, и синтез фитоалексинов [11].

Однако механизмы развития устойчивости растений к грибным патогенам еще далеки от окончательного выяснения [12]. Особенно это важно для конкретного взаимодействия растение-патоген, поскольку установлено, что защитные механизмы, возникающие в растительном организме в ответ на атаку фитопатогеном, часто являются видо- и сортоспецифическими [1]. С этой целью изучено действие  $\beta$ -1,3-глюкана на защитные реакции растений томата при инфицировании грибным патогеном *Fus. oxu*.

### Материалы и методы исследования

Исследования проводили на растениях томата (*Lycopersicon esculentum* Mill.), сорта Тамара. Растения выращивали в почвогрунте «Овощное изобилие» в климатоканнере при температуре 24 °С под люминесцентными лампами на полихроматическом белом свете при освещенности 110 мкмоль квантов/м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup> с фотопериодом 14 ч на протяжении 60 дней, затем корни отмывали и растения переносили на водопроводную воду. После акклиматизации в течение 2-х суток на водной среде растения опрыскивали иммуномодулирующим препаратом, содержащим в качестве прилипателя водорастворимый полимер (ВРПЗ) на основе сополимера акриламида с акрилатом натрия (ООО «Лесохимик», Беларусь) и иммуномодулятор –  $\beta$ -1,3-глюкан из дрожжей (Solgar, США), исходя из нормы расхода препарата (5 мл/1 растение). Контролем служили растения, обработанные дистиллированной водой. Инфицирование грибным патогеном *Fus. oxu* проводили через 48 ч после обработки иммуномодулирующим препаратом путем внесения суспензионной культуры гриба, содержащей 10<sup>6</sup> спор/мл, через корни в водную среду (50 мл/1 растение). Анализ листьев проводили через 72 ч после инокуляции растений патогеном.

Содержание индивидуальных хлорофиллов (Хл) и каротиноидов в листьях томата определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе Shimadzu LC 20 Prominence (Shimadzu, Япония) с использованием хроматографической колонки Nucleodur C18 Gravity, размер частиц – 5 мкм, длина 15 см (Macherey Nagel, Германия). Листья томата (50 мг) гомогенизировали с добавлением 100 мг  $\text{CaCO}_3$  и 2 мл 99,5 % ацетона. Гомогенат два раза центрифугировали в течение 10 мин при 13000 g (микроцентрифуга Microfuge 16, Германия), 0,5 мл супернатанта вносили в вials и помещали в камеру хроматографа. Объем инъекции – 20 мкл. Разделение пигментов в колонке осуществляли растворами А (90 % ацетонитрил, 9,9 % фильтрованная  $\text{H}_2\text{O}$ , 0,1 % триэтиламин) и Б (100 % этилацетат) по программе с расходом 0,5 мл/мин. Пигменты регистрировали диодно-матричным детектором по спектрам поглощения в диапазоне 200–700 нм [13] и количественно определяли по площади пиков.

Определение общего содержания активных форм кислорода (АФК) проводили с помощью флуоресцентного теста, в основе которого лежит образование дихлорфлуоресцеина (ДХФ) из нефлуоресцирующего 2',7'-дихлорфлуоресцеин диацетата (ДХФ-ДА) (Sigma –Aldrich, США) в экстрактах листьев [14], что позволяет судить об общем содержании АФК в растительных клетках, без идентификации отдельных форм. Регистрировали флуоресценцию ДХФ ( $\lambda_{\text{воз.}} = 496$ ,  $\lambda_{\text{рег.}} = 524$  нм) с помощью спектрофлуориметра «SOLAR CM 2203» (Беларусь). О суммарном уровне АФК судили по количеству образовавшегося ДХФ, концентрацию которого рассчитывали по калибровочной кривой, полученной с использованием растворенного в этаноле коммерческого препарата ДХФ (Fluka). Содержание АФК рассчитывали в мкг ДХФ/г сырой массы.

Содержание антоцианов определяли согласно методу [15]. Навеску 0,1 г свежего растительного материала растирали в 0,5 мл 1 %-ного  $\text{HCl}$ . Остаток в ступке еще раз смывали 0,5 мл раствора. К экстракту добавляли 1 мл хлороформа и центрифугировали в течение 10 мин при скорости 12 000 g и температуре 4 °С (центрифуга KAIDA KH22R, Китай). Измеряли оптическую плотность супернатанта при 525 нм на спектрофотометре Shimadzu UV – 2401PC («Shimadzu», Япония). Содержание антоцианов выражали в миллиграммах на грамм сырой массы (в эквиваленте цианидин-3-глюкозида), используя коэффициент молярной экстинкции 31,6 М<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>.

Общее содержание фенольных соединений определяли спектрофотометрическим методом с помощью комплексообразующих реагентов [16]. Метод основан на реакции полифенольных соединений с реактивом Фолина – Чокалтеу, содержащим фосфомолибдат и вольфрамат натрия, которые при восстановлении фенольными соединениями в щелочной среде образуют комплекс синего цвета (вольфрамовая синь),

интенсивность окраски которого пропорциональна количеству фенольных соединений. Фенольные соединения экстрагировали из растительного материала 96%-ным спиртовым раствором. Содержание полифенолов определяли на спектрофотометре «СОЛАР-2201» (Беларусь) по поглощению при 765 нм продуктов окисления фенольных соединений, используя в качестве калибровочного стандарта галловую кислоту. Суммарное содержание фенольных соединений выражали в мг-экв. галловой кислоты/г сырой массы.

Экспрессию генов *PR-2* и *PR-3*, кодирующих ключевые антипатогенные белки –  $\beta$ -1,3- глюканазу и хитиназу соответственно, определяли с помощью полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР-РВ) [17]. Для этого выделяли суммарную РНК из 0,1 г ткани листьев, предварительно растертых в жидком азоте с помощью набора реагентов Лира (<http://biolabmix.ru/>). Качество РНК оценивали методом электрофореза в агарозном геле, ее концентрацию определяли на приборе BioDrop  $\mu$ Lite (Serva). Препараты очищали от примеси геномной ДНК (RNase-free DNase, Thermo Fisher Scientific) и использовали для синтеза первой цепи кДНК Реакционная смесь для синтеза кДНК содержала 200 ед. обратной транскриптазы RevertAidTM M-MuLV, случайные (random) гексамерные праймеры (0,2 мкг), 0,1 мМ ДНТФ, 20 ед. ингибитора рибонуклеаз RiboLock (Thermo Fisher Scientific) в общем объеме реакционной смеси 20 мкл. ПЦР-анализ проводился на термоциклере CFX96 Touch™ Real-Time PCR Detection System (Bio-Rad, США) с использованием набора Luna® Universal qPCR Master Mix («Ферментас», Литва). В реакционную смесь для ПЦР были добавлены специфические олигонуклеотидные праймеры (6–12 пмоль на реакцию), кДНК-матрица в количестве, соответствующем 100 нг тотальной РНК. Программа для термоциклера включала: 95 °C – 5 мин; {94 °C – 30 с, 57–59 °C – 30 с, 72 °C – 30 с} 40 циклов; 72 °C – 7 мин. Скорость изменения температуры – 1 °C/с. Олигонуклеотидные праймеры были синтезированы в ООО «АртБиоТех» (Беларусь) (табл. 1).

Анализ экспрессии генов выполняли в трех биологических повторностях. Для нормализации данных генной экспрессии в качестве референсного гена использовали актин. Оценку экспрессии генов на транскрипционном уровне и статистический анализ результатов проводили с использованием пакета программы *REST-MCS* (<https://www.gene-quantification.de/rest-mcs.html>).

Таблица 1

Нуклеотидная последовательность прямых (F) и обратных (R) праймеров  
и размер специфичных им продуктов амплификации

Table 1

Nucleotide sequence of forward (F) and reverse (R) primers and the size of their specific amplification products

| Олигонуклеотид | Последовательность олигонуклеотида, 5' → 3'             | Размер ампликона, п. н. | Источник |
|----------------|---------------------------------------------------------|-------------------------|----------|
| <i>Chi</i>     | F– AGCACCAGATGGACCATA<br>R– GCTGACTTGAAGCACAGTAA        | 83                      | [18]     |
| <i>Glu</i>     | F– TCAGCAGGGTTGCAAAATCA<br>R– CTCTAGGTGGGTAGGTGTTGGTTAA | 79                      | [19]     |
| <i>Actin</i>   | F–TGTCCCTATTACGAGGGTTATGC<br>R–CAGTTAAATCACGACCAGCAAGAT | 74                      | [20]     |

Примечание. *Chi* – хитиназа, *Glu* – глюканаза, *Actin* – актин.

Полученные данные статистически анализировали с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA), а средние различия сравнивали с критерием Стьюдента с использованием программ *Statistica 6.0* (StatSoft) и *Excel 2010*. Результаты исследований представлены как среднее  $\pm$  стандартная ошибка среднего (SE). Различия при  $p < 0,05$  считались значимыми и отмечены на графиках и таблицах звездочкой.

Результаты исследования и их обсуждение

Изучено влияние  $\beta$ -1,3-глюкана в комплексе с ВРП на рост и развитие мицелия патогенного гриба *Fus. oxu. sp.* в условиях *in vitro*. В эксперименте использовали состав, содержащий ВРП на основе сополимера акриламида с акрилатом натрия (ВРП-3, 0,4 %) и  $\beta$ -1,3-глюкан (0,01 %), который вводили в среду Чапека. В контрольном варианте препарат в среду культивирования не добавляли. Из полученных данных следует, что активный рост мицелия происходит в условиях, когда в твердую среду (агар) вносится ВРП-3 (табл. 2).

В этих условиях площадь колоний гриба увеличивается практически в 4 раза по отношению к контрольному варианту. Усиленный рост мицелия наблюдается и на среде, содержащей  $\beta$ -1,3-глюкан и ВРП-3, где под их влиянием площадь колоний увеличивается в 4,7 раза соответственно (табл. 2). Таким образом, оценка влияния  $\beta$ -1,3-глюкана на рост грибного мицелия показала, что это соединение не обладает антифунгальной активностью.

Таблица 2

Влияние  $\beta$ -1,3-глюкана и водорастворимого полимера на развитие гриба *Fus. oxy*. (7 дней роста)

Table 2

Effect of  $\beta$ -1,3-glucan and water-soluble polymer on the development of the fungus *Fus. oxy*. (7 days of growth)

|   | Варианты                                   | Размер колоний  |        |
|---|--------------------------------------------|-----------------|--------|
|   |                                            | см <sup>2</sup> | %      |
| 1 | Контроль                                   | 7,1 ± 0,5       | 100    |
| 2 | ВРП (0,4 %)                                | 28,3 ± 2,1*     | 398,6  |
| 3 | ВРП (0,4 %) + $\beta$ -1,3-глюкан (0,01 %) | 33,2 ± 2,8*     | 467,6* |

Примечание. \* Различия достоверны между 1 и 2(3) ( $p \leq 0,05$ ).

$\beta$ -глюканы – нерастворимые полисахариды, широко присутствующие в дрожжах, грибах, бактериях, водорослях, ячмене и овсе [21]. В работе *in vitro* было изучено влияние экстракта морских водорослей *Ascophyllum nodosum* в разных дозах (0,5 %; 1,0; 2,0; 4,0 и 8,0 %) на морфологию и целлюлозолитическую способность гриба *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum* [22]. Было подтверждено, что препарат при увеличении дозы индуцировал рост мицелия гриба, что определялось по диаметру колоний и свежей массе мицелия, выращенного в культуральной среде с картофелем и декстрозой. Этот результат сопровождался прогрессивным увеличением активности ферментов  $\beta$ -1,3-глюканазы и хитиназы, участвующих в процессе удлинения гифов патогенного гриба.

Мы обнаружили сильную стимуляцию роста мицелия на культуральной среде, содержащей ВРП (табл. 2). Наблюдаемый стимулирующий эффект может быть обусловлен высокой водоудерживающей способностью полимера, с одной стороны, и его рострегулирующей активностью – с другой [23]. Таким образом, изучение влияния препарата, содержащего  $\beta$ -1,3-глюкан и ВРП, на рост грибного мицелия свидетельствует, что эти соединения не обладают противогрибковой активностью и более того стимулируют развитие гриба *Fus. oxy*.

У растений в процессе эволюции развились рецепторы, позволяющие определять уникальные молекулы микроба, так называемые молекулярные паттерны, связанные с микробами (microbe-associated molecular patterns, МАР).  $\beta$ -глюкан, наиболее распространенный полисахарид клеточной стенки грибов, также служит МАР, но механизмы восприятия и передачи сигналов  $\beta$ -глюкана в растениях в значительной степени неизвестны [24]. Обнаружено, что в растениях при распознавании глюканов образуются  $H_2O_2$  и фитоалексины, активируются PR-гены. Рецептор неизвестен, но рецептор-подобная киназа с 30 % сходством с Дектин-1 животных обнаружена в *A. thaliana* и соевых бобах.

Таким образом, наиболее ранней реакцией растительного организма на внедрение возбудителя является генерация АФК, которые оказывают прямое противогрибковое действие на микроорганизмы, а также могут выполнять сигнальную функцию, необходимую для формирования системной приобретенной резистентности [25]. В этой связи прежде всего было изучено влияние состава, содержащего  $\beta$ -1,3-глюкан и ВРП, на общий уровень АФК в здоровых и инфицированных листьях томата (табл. 3). Обнаружено, что атака патогеном не приводит к изменению содержания АФК в листьях томата в сравнении с контролем, тогда как предобработка растений составом на основе  $\beta$ -1,3-глюкана способствовала повышению на 42,7 % общего уровня АФК в условиях поражения *Fus. oxy*.

Таблица 3

Влияние *Fus. oxy*. и обработки препаратом, содержащим  $\beta$ -1,3-глюкан и ВРП, на содержание суммы АФК, полифенолов и антоцианов в листьях томата

Table 3

Effect of *Fus. oxy*. and treatment with a preparation containing  $\beta$ -1,3-glucan and WSP on the content of total ROS, polyphenols and anthocyanins in tomato leaves

| Вариант                                         | Содержание АФК, мкг ДХФ/г сырой массы | Содержание полифенолов, мг-экв. галловой кислоты /г сырой массы | Содержание антоцианов, мг/г сырой массы |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1 Контроль                                      | 10,31 ± 0,080                         | 8,75 ± 0,44                                                     | 0,44 ± 0,03                             |
| 2 <i>Fus. oxy</i> .                             | 10,36 ± 0,018                         | 14,75 ± 0,42*                                                   | 0,53 ± 0,02*                            |
| 3 $\beta$ -1,3-глюкан + ВРП + <i>Fus. oxy</i> . | 14,71 ± 0,30*                         | 20,80 ± 0,38**                                                  | 0,57 ± 0,03*                            |

Примечание. \* Различия достоверны между 1 и 2(3) (t-критерий,  $p \leq 0,05$ );

\*\*различия достоверны между 2 и 3 (t-критерий,  $p \leq 0,05$ ).

Защитная роль фенольных соединений, которую они играют при поражении растений грибковыми патогенами, широко документирована [26]. Предварительно синтезированные противогрибковые фенольные соединения здоровых растений обычно находятся в вакуолях или органеллах в конъюгированной форме, чаще с гликозидными связями. Биотрофы могут избежать высвобождения из депо фенольных соединений, минимизируя ущерб растению-хозяину, тогда как некротрофы, вызывают значительное высвобождение этих соединений. Обнаружено, что мутант ячменя (Ant 18-159) оказался чрезвычайно устойчивым к поражению фузариозом, поскольку гифы гриба не смогли проникнуть в зерна этого мутанта из-за присутствия в них противогрибковых фенольных соединений [27].

В качестве защитных реакций было изучено накопление фенольных соединений, включая антоцианы, в листьях растений томата в условиях эксперимента. Показано, что при фузариозном поражении растений наблюдается повышение содержания антоцианов на 20,5 % относительно контроля, а после предобработки  $\beta$ -1,3-глюканом в комплексе с ВРП прослеживается тенденция к еще более заметному увеличению их количества (табл. 3). В инфицированных листьях томата отмечено также повышение общего содержания полифенолов на 68,6 % относительно уровня в здоровых листьях, а в предобработки растений томата иммуномодулятором их количество в инфицированных листьях возросло в 2,38 раза в сравнении с контролем (табл. 3). Следовательно, состав на основе  $\beta$ -1,3-глюкана индуцирует развитие защитных реакций в пораженных фузариозом листьях томата на уровне вторичных метаболитов, участвующих в регуляции окислительно-восстановительных процессов в растительных клетках.

Основными токсинами, вырабатываемыми *Fus. oxu.*, являются фузаровая кислота, ликомаразмин и дегидрофузаровая кислота [28]. Действие фузаровой кислоты связано со снижением фотосинтеза, увяданием, некрозом листьев, гибелью клеток, снижением жизнеспособности растительных клеток и распространением патогена по органам растения [29]. Как было показано ранее, развитие фузариозного увядания в зависимости от условий приводит к подавлению фотосинтетической активности растений томата по двум разным механизмам [30]. В случае медленного увядания (тип I) было продемонстрировано снижение эффективности светосбора и разделения зарядов в реакционных центрах ФС 2, подавление переноса электронов на акцепторной стороне ФС 2 и снижение активности ключевого фермента темновой стадии фотосинтеза – рибулозо-1,5-бисфосфаткарбоксилазы/оксигеназы. В случае быстрого увядания (II тип) фотохимическая активность хлоропластов подавлялась в меньшей степени, чем при фузариозном увядании I типа.

Одним из основных показателей фотосинтетической активности растений является содержание пластидных пигментов. Этот показатель, как правило, рассматривается в качестве интегрального критерия оценки эффективности поглощения солнечной энергии листовой поверхностью и является показателем функционального состояния фотосинтетического аппарата [31]. Методом ВЭЖХ было исследовано влияние *Fus. oxu.* и состава на основе  $\beta$ -1,3-глюкана на содержание фотосинтетических пигментов в листьях томата. В результате проведенных обработок качественный состав компонентов у всех исследованных образцов не изменялся. Количественный анализ содержания пигментов показал, что патогенный гриб оказывает негативное действие на содержание Хл и каротиноидов (табл. 4). Обработка растений составом, содержащим  $\beta$ -1,3-глюкан, способствовала устранению ингибирующего действия патогена на пигментный аппарат, повышая количество Хл. Так, относительное содержание Хл *a* в инфицированных растениях повышалось с 35,39 до 68,46 %, а Хл *b* – с 39,75 до 75,88 % в результате обработки препаратом с  $\beta$ -1,3-глюканом (табл. 4).

Таблица 4

Влияние  $\beta$ -1,3-глюкана на относительное содержание хлорофилла и каротиноидов  
в листьях томата, измеренное методом ВЭЖХ

Table 4

Effect of  $\beta$ -1,3-glucan on the relative content of chlorophyll and carotenoids in tomato leaves measured by HPLC

|   | Варианты                                      | Неоксантин | Виолаксантин | Антероксантин | Лютеин | Хл <i>b</i> | Хл <i>a</i> | $\beta$ -каротин |
|---|-----------------------------------------------|------------|--------------|---------------|--------|-------------|-------------|------------------|
| 1 | Контроль                                      | 100        | 100          | 100           | 100    | 100         | 100         | 100              |
| 2 | <i>Fus. oxu.</i>                              | 38,65      | 32,62        | 62,21         | 48,37  | 39,75       | 35,39       | 33,22            |
| 3 | $\beta$ -1,3-глюкан+ ВРП+<br><i>Fus. oxu.</i> | 70,67      | 55,72        | 70,05         | 81,10  | 75,88       | 68,46       | 62,62            |

Примечание. Количество отдельных форм пигментов, рассчитанное в мкг/г сырой массы, выражено в % от содержания соответствующего пигмента в контрольном образце.

Нами не обнаружено даже следовых количеств зеаксантина как в здоровых, так и в инфицированных листьях томата. При этом инфицирование грибом снижало содержание виолаксантина до 32,62 %, а неоксантина – до 38,65 % в сравнении с контролем. Менее выраженный ингибирующий эффект отмечен для антраксантина (62,21 %) и лютеина (48,37 %).

Из полученных данных следует, что пленкообразующий состав, содержащий  $\beta$ -1,3-глюкан, предотвращает вызванное патогеном снижение содержания каротиноидов, повышая их количество в тканях листа, которое однако не достигает уровня пигментов в здоровых растениях (табл. 4). Показано, что каротиноиды ( $\beta$ -каротин и ксантофиллы) играют важную роль в защите клеток от стресса и обладают способностью подавлять АФК в растениях томата [32]. Таким образом, антиоксидантная эффективность более высоких уровней мажорных каротиноидов, наряду с фенольными соединениями, может быть непосредственным компонентом антиоксидантной защиты при фузариозном увядании.

Растительные  $\beta$ -1,3-глюканазы являются одним из важнейших классов ферментов, участвующих во взаимодействиях растение-патоген, поэтому их большое включено в группу белков, связанных с патогенезом (PR-2) [33]. Очищенные  $\beta$ -1,3-глюканазы оказывают ингибирующее действие на прорастание спор грибов и рост гифов, вызывая деформации и лизис мицелия вследствие гидролиза стенок грибов. Такой тип противогрибковой активности проявляла табачная  $\beta$ -1,3-глюканаза Glu II в отношении *Fus. solani* [34]. Хитиназы представляют собой гликозилгидролазы и широко встречаются в различных организмах в природе. Они считаются группой белков, связанных с патогенезом (PR-3) [35]. При инокуляции устойчивого сорта огурца JIN5-508 *Podosphaera xanthii* экспрессия генов хитиназы значительно повышалась, что запускало реакцию сверхчувствительности, останавливающую инвазию мучнистой росы [36]. При подавлении генов хитиназы *Chi23*, *Chi32* и *Chi47* наблюдалось снижение устойчивости хлопка к *Verticillium dahliae* [37].

Для сравнительного анализа возможного ответа на обработку  $\beta$ -1,3-глюканом была определена экспрессия генов защитных белков –  $\beta$ -1,3-глюканазы (*Glu*) и хитиназы (*Chi*). Расчет проводили с учетом значений *Sq* для гена-нормализатора и относительно контроля (вариант 1, табл. 5).

Таблица 5

Экспрессии генов  $\beta$ -1,3-глюканазы (*Glu*) и хитиназы (*Chi*) в листьях томата

Table 5

Expressions of  $\beta$ -1,3-glucanase (*Glu*) and chitinase (*Chi*) genes in tomato leaves

|   | Варианты                               | Уровень экспрессии гена <i>Glu</i> ,<br>отн. ед. | Уровень экспрессии гена <i>Chi</i> ,<br>отн. ед. |
|---|----------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1 | Контроль                               | 1,0                                              | 1,0                                              |
| 2 | <i>Fus. oxu.</i>                       | 1,085 $\pm$ 0,008                                | 1,684 $\pm$ 0,066*                               |
| 3 | $\beta$ -1,3-глюкан                    | 4,321 $\pm$ 0,234*                               | 1,109 $\pm$ 0,019                                |
| 4 | $\beta$ -1,3-глюкан + <i>Fus. oxu.</i> | 4,182 $\pm$ 0,234*                               | 3,209 $\pm$ 0,266*                               |

Примечание. \*Различия достоверны между контролем и опытом ( $p \leq 0,05$ ).

Обработка  $\beta$ -1,3-глюканом растений томата вызывала значительное повышение относительного уровня экспрессии гена *Glu* как в здоровых, так и в инфицированных *Fus. oxu.* растениях томата (на 3,32 и 3,18 отн. ед. соответственно). Уровень относительной экспрессии гена *Chi* также значительно повысился после предварительной обработки  $\beta$ -1,3-глюканом с последующим заражением *Fus. ox.* (на 2,21 отн. ед. относительно контроля).

Увеличение экспрессии данных генов может приводить к активизации синтеза PR-белков ( $\beta$ -1,3-глюканазы и хитиназы), обладающих противогрибковой гидролитической активностью и оказывающих ингибирующее действие на прорастание спор и рост гифов патогенных грибов.

## Заключение

Фузариозное увядание, вызываемое *Fus. oxu.*, является одним из наиболее опасных заболеваний томата и приводит либо к гибели растений, либо к значительному снижению урожайности. Использование биогенных соединений обеспечивает успешную защиту от многих грибковых заболеваний за счет метаболических изменений в растениях, включая индукцию ферментов биосинтеза фенолов, антиоксидантных защитных ферментов и низкомолекулярных антиоксидантов. В данной работе экспериментально доказано,

что препарат, состоящий из  $\beta$ -1,3-глюкана и ВРП, вызывает усиление защитных систем в листовых клетках томата путем генерации АФК и стимуляции биосинтеза вторичных метаболитов (полифенолов и антоцианов), повышения содержания фотосинтетических пигментов и активации генов защитных белков, что позволяет использовать эти соединения для создания нового природного защитного средства для борьбы с фузариозом томата. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение характера влияния препарата в контролируемых и полевых условиях в течение всего цикла развития растений томата с привлечением широкого диапазона физиологических и биохимических параметров, включая оценку урожайности и качества овощной продукции.

### Библиографические ссылки

1. Шакирова ФМ. *Неспецифическая устойчивость растений к стрессовым факторам и её регуляция*. Уфа: Гилем; 2001. 160 с.
2. Пересыпкин ВФ, редактор. *Болезни сельскохозяйственных культур*. Киев: Урожай; 1991. Том 3. 512 с.
3. Сидорова СФ. *Вертициллезное и фузариозное увядание однолетних сельскохозяйственных культур*. Москва: Колос; 1983. 157 с.
4. Leubner-Metzger G. Functions and regulation of  $\beta$ -1,3-glucanase during seed germination, dormancy release and after-ripening. *Seed Science Research*. 2003;13(1):17–34.
5. Leclercq J, Fliegmann J, Tellstroem V. Identification of a multigene family encoding putative beta-glucan-binding proteins in *Medicago truncatula*. *Journal of Plant Physiology*. 2008;165(7):766–76.
6. Sriram S, Misra RS, Sahu AK, Maheswari SK. A cell wall glucan elicitor induces resistance in taro against *Phytophthora* leaf blight. *Journal of Plant Diseases and Protection*. 2003;110(1):17–26.
7. Klarzynski O, Plesse B, Joubert JM, Yvin JC, Kopp M, Kloareg B, et al. Linear  $\beta$ -1,3 glucans are elicitors of defense responses in tobacco. *Plant Physiology*. 2000;124(3):1027–1038.
8. Mérida H, Sopena-Torres S, Bacete L, Garrido-Arandia M, Jordá L, López G, et al. Non-branched  $\beta$ -1,3-glucan oligosaccharides trigger immune responses in *Arabidopsis*. *The Plant Journal*. 2018;93(1):34–49.
9. Inui H, Yamaguchi Y, Hirano S. Elicitor actions of N-acetylchitoooligosaccharides and laminarioligosaccharides for chitinase and L-phenylalanine ammonia-lyase induction in rice suspension culture. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*. 1997;61(6):975–978.
10. Cosio EG, Feger M, Miller CJ, Antelo L, Ebel J. High-affinity binding of fungal  $\beta$ -glucan elicitors to cell membranes of species of the plant family Fabaceae. *Planta*. 1996;200(1):92–99.
11. Aziz A, Poinssot B, Daire X, Adrian M, Bézier A, Lambert B, et al. Laminarin elicits defense responses in grapevine and induces protection against *Botrytis cinerea* and *Plasmopara viticola*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 2003;16(12):1118–1128.
12. Kabashnikova L, Abramchik L, Domanskaya I, Savchenko G, Shpileuski S.  $\beta$ -1,3-glucan effect on the photosynthetic apparatus and oxidative stress parameters of tomato leaves under fusarium wilt. *Functional Plant Biology*. 2020;47(11):988–997.
13. Rodrigues-Amaya DB, Kimura M. *Handbook for Carotenoid Analysis*. Washington, D. C.: HarvestPlus; 2004. 63 p.
14. LeBel CP, Ischiropoulos H, Bondy SC. Evaluation of probe 2',7'-dichlorofluorescein as an indicator of oxygen species formation and oxidative stress. *Chemical Research in Toxicology*. 1992;9:304–307.
15. Mabry TJ, Markham KR, Thomas MB. *The systematic identification of flavonoids*. Berlin: Springer; 1970. 354 p.
16. Николаева ТН, Лапшин ПВ, Загоскина НВ. Метод определения суммарного содержания фенольных соединений в растительных экстрактах с реактивом Фолина-Дениса и реактивом Фолина-Чокальтеу: модификация и сравнение. *Химия растительного сырья*. 2021;(2):291–299.
17. Ребриков ДВ, Саматов ГА, Трофимов ДЮ, Семенов ПА. *ПЦР в реальном времени*. Москва: ГЭОТАР-Медиа; 2015. 233 с.
18. Cao J, Tan X. Comprehensive Analysis of the Chitinase Family Genes in Tomato (*Solanum lycopersicum*). *Plants*. 2019;8(3):52.
19. Milling A, Babujee L, Allen C. *Ralstonia solanacearum* extracellular polysaccharide is a specific elicitor of defense responses in wilt-resistant tomato plants. *PLoS One*. 2011;6(1). DOI: 10.1371/journal.pone.0015853.
20. Ren Z, Li Z, Miao Q, Yang Y, Deng W, Hao Y. The auxin receptor homologue in *Solanum lycopersicum* stimulates tomato fruit set and leaf morphogenesis. *Journal of Experimental Botany*. 2011 May;62(8):2815–2826.
21. Du B, Meenu M, Liu H, Xu B. A Concise Review on the Molecular Structure and Function Relationship of  $\beta$ -Glucan. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(16):4032.
22. Melo TA, Serra IMRS, Nascimento ITVS. *Ascomycetum nodosum* seaweed extract effect on morphology and cellulolytic ability of the fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum*. *Research, Society and Development*. 2020;9(11). DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.991322>.
23. Круль ЛП, Нарейко ЭИ, Матусевич ЮИ, Якимцова ЛВ, Матусевич В. Суперабсорбенты на основе сополимеров акриламида с акрилатом натрия. *Polymer Bulletin*. 2000;45(2):159–165.
24. Fesel PH, Zuccaro A.  $\beta$ -glucan: Crucial component of the fungal cell wall and elusive MAMP in plants. *Fungal Genetics and Biology*. 2016;90:53–60.
25. Khan M, Ali S, Al Azzawi TNI, Saqib S, Ullah F, Ayaz A, et al. The Key Roles of ROS and RNS as a Signaling Molecule in Plant-Microbe Interactions. *Antioxidants (Basel)*. 2023;12(2):268.
26. Vincenzo L, Veronica MT, Cardinali L, Cardinali A. Role of phenolics in the resistance mechanisms of plants against fungal pathogens and insects. In: Imperato F, editor. *Phytochemistry: Advances in Research*. Kerala, India: Research Signpost; 2006:23–67.
27. Skadhauge B, Thomsen KK, Wettstein DV. The role of the barley testa layer and its flavonoid content in resistance to *Fusarium* infections. *Hereditas*. 1977;126:147–160.
28. López-Zapata SP, García-Jaramillo DJ, López WR, Ceballos-Aguirre N. Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* interaction. A review. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*. 2021;24(1). DOI: <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1713>.
29. Srinivas C, Nirmala D, Narasimha Murthy K, Mohan CD, Lakshmeesha TR, Singh B, et al. *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* causal agent of vascular wilt disease of tomato: biology to diversity - A review. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2019;26(7):1315–1324.

30. Пишибытко НЛ, Зеневич ЛА, Кабашникова ЛФ. Изменения в фотосинтетическом аппарате при фузариозном увядании томата. *Физиология растений*. 2006;53(1):25–31.
31. Кабашникова ЛФ. *Фотосинтетический аппарат и стресс у растений*. Минск: Беларуская навука; 2014. 267 с.
32. Sen S, Mukherji S. Season-controlled changes in biochemical constituents and oxidase enzyme activities in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Environmental Biology*. 2009;30(4):479–483.
33. Balasubramanian V, Vashisht D, Cletus J, Sakthivel N. Plant  $\beta$ -1,3-Glucanases: Their Biological Functions and Transgenic Expression against Phytopathogenic Fungi. *Biotechnology Letters*. 2012;34:1983–1990.
34. Sela-Buurlage MB, Ponstein AS, Bres-Vloemans SA, Melchers LS, Van Den Elzen PJM, Cornelissen BJC. Only Specific Tobacco (*Nicotiana tabacum*) Chitinases and  $\beta$ -1,3-Glucanases Exhibit Antifungal Activity. *Plant Physiology*. 1993;101:857–863.
35. Wen X, Tengsheng Z, Dandan L, Sufang A, Jinna H, Genyi L. Evolution and Expression Divergence of the Chitinase Gene Family against *Leptosphaeria maculans* and *Sclerotinia sclerotiorum* Infection in *Brassica napus*. *Journal of Henan Agricultural Sciences*. 2020;49:89–103.
36. Li J, Zhang R, Qi X, Xie Q, Chen X. A Preliminary Study on Cloning of Chitinase Gene and Relationships to Resistance of Powdery Mildew in Cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Molecular Plant Breeding*. 2015;13:1584–1591.
37. Xu J, Xu X, Tian L, Wang G, Zhang X, Wang X, et al. Discovery and identification of candidate genes from the chitinase gene family for *Verticillium dahliae* resistance in cotton. *Scientific Reports*. 2016;6:29022.

## References

1. Shakirova FM. *Nespecifichekaya ustoychivost' rasteniy k stressovym faktoram i yeyo regulyatsiya* [Nonspecific resistance of plants to stress factors and its regulation]. Ufa: Gilem; 2001. 160 p. Russian.
2. Peresypkin VF, editor. *Bolezni sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Diseases of agricultural crops]. Kiev: Urozhay; 1991. T. 3. 512 p. Russian.
3. Sidorova SF. *Vertitsilleznoe i fuzarioznoe uvyanie odnoletnikh sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Verticillous and fusarium wilting of annual crops]. Moscow: Kolos; 1983. 157 p. Russian.
4. Leubner-Metzger G. Functions and regulation of  $\beta$ -1,3-glucanase during seed germination, dormancy release and after-ripening. *Seed Science Research*. 2003;13(1):17–34.
5. Leclercq J, Fliegmann J, Tellstroem V. Identification of a multigene family encoding putative beta-glucan-binding proteins in *Medicago truncatula*. *Journal of Plant Physiology*. 2008;165(7):766–776.
6. Sriram S, Misra RS, Sahu AK, Maheswari SK. A cell wall glucan elicitor induces resistance in taro against *Phytophthora* leaf blight. *Journal of Plant Diseases and Protection*. 2003;110(1):17–26.
7. Klarzynski O, Plesse B, Joubert JM, Yvin JC, Kopp M, Kloareg B, et al. Linear  $\beta$ -1,3 glucans are elicitors of defense responses in tobacco. *Plant Physiology*. 2000;124(3):1027–1038.
8. Mérida H, Sopena-Torres S, Bacete L, Garrido-Arandia M, Jordá L, López G, et al. Non-branched  $\beta$ -1,3-glucan oligosaccharides trigger immune responses in *Arabidopsis*. *The Plant Journal*. 2018;93(1):34–49.
9. Inui H, Yamaguchi Y, Hirano S. Elicitor actions of N-acetylchitoooligosaccharides and laminarioligosaccharides for chitinase and L-phenylalanine ammonia-lyase induction in rice suspension culture. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*. 1997;61(6):975–978.
10. Cosio EG, Feger M, Miller CJ, Antelo L, Ebel J. High-affinity binding of fungal  $\beta$ -glucan elicitors to cell membranes of species of the plant family Fabaceae. *Planta*. 1996;200(1):92–99.
11. Aziz A, Poinssot B, Daire X, Adrian A, Bézier A, Lambert B, et al. Laminarin elicits defense responses in grapevine and induces protection against *Botrytis cinerea* and *Plasmopara viticola*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 2003;16(12):1118–1128.
12. Kabashnikova L, Abramchik L, Domanskaya I, Savchenko G, Shpileuski S.  $\beta$ -1,3-glucan effect on the photosynthetic apparatus and oxidative stress parameters of tomato leaves under fusarium wilt. *Functional Plant Biology*. 2020;47(11):988–997.
13. Rodrigues-Amaya DB, Kimura M. *Handbook for Carotenoid Analysis*. Washington, D. C.: HarvestPlus; 2004. 63 p.
14. LeBel CP, Ischiropoulos H, Bondy SC. Evaluation of probe 2,2',7'-dichlorofluorescein as an indicator of oxygen species formation and oxidative stress. *Chemical Research in Toxicology*. 1992;9:304–307.
15. Mabry TJ, Markham KR, Thomas MB. *The Systematic Identification of Flavonoids*. Berlin: Springer; 1970. 354 p.
16. Nikolaeva TN, Lapshin PV, Zagorskina NV. *Metod opredeleniya summarogo soderzhaniya fenol'nykh soedineniy v rastitel'nykh ekstraktakh s reaktivom Folina-Denisa i reaktivom Folina-Chokal'teu: modifikatsiya i sravnenie* [Method for determining the total content of phenolic compounds in plant extracts with Folin-Denis reagent and Folin-Chocalteu reagent: modification and comparison]. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Material]. 2021;(2):291–299. Russian.
17. Rebrikov DV, Samatov GA, Trofimov DY, Semenov PA. *PTsR v real'nom vremeni* [Real-time PCR]. Moscow: GEOTAR-Media; 2015. 233 p. Russian.
18. Cao J, Tan X. Comprehensive Analysis of the Chitinase Family Genes in Tomato (*Solanum lycopersicum*). *Plants*. 2019;8(3):52.
19. Milling A, Babujee L, Allen C. *Ralstonia solanacearum* extracellular polysaccharide is a specific elicitor of defense responses in wilt-resistant tomato plants. *PLoS One*. 2011;6(1). DOI: 10.1371/journal.pone.0015853.
20. Ren Z, Li Z, Miao Q, Yang Y, Deng W, Hao Y. The auxin receptor homologue in *Solanum lycopersicum* stimulates tomato fruit set and leaf morphogenesis. *Journal of Experimental Botany*. 2011; 62(8):2815–2826.
21. Du B, Meenu M, Liu H, Xu B. A Concise Review on the Molecular Structure and Function Relationship of  $\beta$ -Glucan. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(16):4032.
22. Melo TA, Serra IMRS, Nascimento ITVS. *Ascophyllum nodosum* seaweed extract effect on morphology and cellulolytic ability of the fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum*. *Research, Society and Development*. 2020;9(11). DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.991322>.
23. Krul LP, Nareyko EI, Matusevich YuI, Yakimtsova LV, Matusevich V. *Superabsorbenty na osnove sopolimerov akrilamida s akrilatom natriya* [Superabsorbents based on copolymers of acrylamide with sodium acrylate]. *Polymer Bulletin*. 2000;45(2):159–165.
24. Fesel PH, Zuccaro A.  $\beta$ -glucan: Crucial component of the fungal cell wall and elusive MAMP in plants. *Fungal Genetics and Biology*. 2016;90:53–60.
25. Khan M, Ali S, Al Azzawi TNI, Saqib S, Ullah F, Ayaz A, et al. The Key Roles of ROS and RNS as a Signaling Molecule in Plant-Microbe Interactions. *Antioxidants (Basel)*. 2023;12(2):268.

26. Vincenzo L, Veronica MT, Cardinali L, Cardinali A. Role of phenolics in the resistance mechanisms of plants against fungal pathogens and insects. In: Imperato F, editor. *Phytochemistry: Advances in Research*. Kerala, India: Research Signpost; 2006:23–67.
27. Skadhauge B, Thomsen KK, Wettstein DV. The role of the barley testa layer and its flavonoid content in resistance to Fusarium infections. *Hereditas*. 1977;126:147–160.
28. López-Zapata SP, García-Jaramillo DJ, López WR, Ceballos-Aguirre N. Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) and Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici interaction. A review. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*. 2021;24(1). DOI: <https://doi.org/10.31910/rudca.v24.n1.2021.1713>.
29. Srinivas C, Nirmala D, Narasimha Murthy K, Mohan CD, Lakshmeesha TR, Singh B, et al. Fusarium oxysporum f. sp. lycopersici causal agent of vascular wilt disease of tomato: biology to diversity – A review. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2019;26(7):1315–1324.
30. Pshibitko NL, Zenevich LA, Kabashnikova LF. *Izmeneniya v fotosinteticheskom apparate pri fuzarioznom uvyaniye tomata* [Changes in the photosynthetic apparatus during fusarium wilt of tomatoes]. *Fiziologiya Rasteniy* [Russian Journal of Plant Physiology]. 2006;53(1):25–31. Russian.
31. Kabashnikova LF. *Fotosinteticheskiy apparat i stress u rasteniy* [Photosynthetic apparatus and stress in plants]. Minsk: Belaruskaya navuka; 2014. 267 p. Russian.
32. Sen S, Mukherji S. Season-controlled changes in biochemical constituents and oxidase enzyme activities in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Environmental Biology*. 2009;30(4):479–483.
33. Balasubramanian V, Vashisht D, Cletus J, Sakthivel N. Plant beta-1,3-glucanases: their biological functions and transgenic expression against phytopathogenic fungi. *Biotechnology Letters*. 2012;34(11):1983–1990.
34. Sela-Buurlage MB, Ponstein AS, Bres-Vloemans SA, Melchers LS, Van Den Elzen PJM, Cornelissen BJC. Only Specific Tobacco (*Nicotiana tabacum*) Chitinases and  $\beta$ -1,3-Glucanases Exhibit Antifungal Activity. *Plant Physiology*. 1993;101:857–863.
35. Wen X, Tengsheng Z, Dandan L, Sufang A, Jinna H, Genyi L. Evolution and Expression Divergence of the Chitinase Gene Family against *Leptosphaeria maculans* and *Sclerotinia sclerotiorum* Infection in Brassica napus. *Journal of Henan Agricultural Sciences*. 2020;49:89–103.
36. Li J, Zhang R, Qi X, Xie Q, Chen X. A Preliminary Study on Cloning of Chitinase Gene and Relationships to Resistance of Powdery Mildew in Cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Molecular Plant Breeding*. 2015;13:1584–1591.
37. Xu J, Xu X, Tian L, Wang G, Zhang X, Wang X, et al. Discovery and identification of candidate genes from the chitinase gene family for *Verticillium dahliae* resistance in cotton. *Scientific Reports*. 2016;6:29022.

Статья поступила в редколлегию 06.08.2024.  
Received by editorial board 06.08.2024.

---

# РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

---

## RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

---

УДК 535.231.16:614.876

### ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА РЕКОНСТРУКЦИИ ИНДИВИДУАЛИЗИРОВАННЫХ ДОЗ ВНЕШНЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ЛИЦ, ПРОЖИВАЮЩИХ НА РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ

Д. Б. КУЛИКОВИЧ<sup>1), 2)</sup>, Н. Г. ВЛАСОВА<sup>3)</sup>, Ю. В. ВИСЕНБЕРГ<sup>1)</sup>, Б. К. КУЗНЕЦОВ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Гомельский государственный медицинский университет,  
ул. Ланге, 5, 246000, г. Гомель, Беларусь

<sup>2)</sup>Международный государственный экологический институт  
им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет,  
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

<sup>3)</sup>Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека,  
ул. Ильича, 290, 246040, Гомель, Беларусь

---

#### Образец цитирования:

Куликович ДБ, Власова НГ, Висенберг ЮВ, Кузнецов БК. Верификация метода реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на радиоактивно загрязненной территории. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;3:59–68.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-59-68>

#### For citation:

Kulikovich DB, Vlasova NG, Visenberg YuV, Kuznetsov BK. Verification of the method for reconstruction of individualized external exposure doses to persons living in a contaminated territory with radionuclides. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;3:59–68. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-59-68>

---

#### Авторы:

**Дмитрий Борисович Куликович** – старший преподаватель кафедры медицинской и биологической физики<sup>1)</sup>; аспирант кафедры экологической медицины и радиобиологии<sup>2)</sup>.

**Наталья Генриховна Власова** – доктор биологических наук, профессор; заведующий лабораторией радиационной защиты.

**Юлия Валерьевна Висенберг** – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры нормальной и патологической физиологии.

**Борис Куприянович Кузнецов** – кандидат биологических наук, доцент; заведующий кафедрой медицинской и биологической физики.

#### Authors:

**Dmitry B. Kulikovich**, senior lecturer at the department of medical and biological physics<sup>a</sup>; postgraduate student at the department of environmental medicine and radiobiology<sup>b</sup>.  
[dimaproud@mail.ru](mailto:dimaproud@mail.ru)

**Natalie G. Vlasova**, doctor of science (biology), full professor; head of the department of the radiation protection laboratory.  
[natalie\\_vlasova@mail.ru](mailto:natalie_vlasova@mail.ru)

**Yuliya V. Visenberg**, PhD (biology), docent; associate professor at the department of normal and pathological physiology.  
[visenju@mail.ru](mailto:visenju@mail.ru)

**Boris K. Kuznetsov**, PhD (biology), docent; head of the department medical and biological physics.  
[borkuz@list.ru](mailto:borkuz@list.ru)

Корректная оценка индивидуальных доз облучения населения является неотъемлемой составляющей для проведения радиационно-эпидемиологических исследований по установлению зависимости «доза – эффект» и выявлению наиболее облучаемых групп населения. При этом трудности в оценке индивидуальных доз внешнего облучения возникают при недостатке или отсутствии данных индивидуального дозиметрического контроля. В связи с этим оценка доз внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории, осуществляется методом реконструкции последних на основе официальных методических документов. Из-за консервативности существующих методик реконструкции доз внешнего облучения многие из них попросту не соответствуют задаче индивидуализации доз, так как позволяют оценить лишь средние значения в населенном пункте, а многие приводят к значительным ошибкам (300 % и более). На основании вышеизложенного нами ранее был разработан новый метод реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения, который позволяет учесть не только прямой фактор дозоформирования – плотность поверхностного загрязнения по  $^{137}\text{Cs}$ , но и такие «косвенные» факторы, как профессиональная занятость, пол и возраст индивида. Для оценки адекватности разработанного нами метода и возможности его использования для реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения была проведена его верификация. Для этого была сформирована исследовательская выборка из данных индивидуального дозиметрического контроля жителей Могилевской обл. за 2005 и 2006 гг. Выборка сформирована с учетом представительности по типу профессиональной занятости сельского населения, по полу и возрасту, которые статистически обосновано оказывают влияние на формирование индивидуальной дозы внешнего облучения. Результат сравнительного анализа реконструированных доз с данными ИДК показал, что для выборки в целом за каждый год и для групп профессиональной занятости модельные оценки и данные ИДК полностью сопоставимы, ошибка оценки не превышала 11 %. Таким образом, верификация разработанного метода реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на радиоактивно загрязненной территории, свидетельствует, что предложенный метод может быть использован при недостаточном количестве данных ИДК, либо при их отсутствии для прогноза индивидуальных доз внешнего облучения лиц, проживающих на радиоактивно загрязненной территории.

**Ключевые слова:** доза внешнего облучения; индивидуальный дозиметрический контроль; индивидуализированная доза; информативный фактор-признак; группа профессиональной занятости; регрессионная модель.

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках НИР по теме «Разработать и внедрить метод оценки и прогноза индивидуализированных накопленных доз облучения лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС и проживающих на радиоактивно загрязненной территории» Государственной программы по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2021–2025 годы Республики Беларусь, регистрационный № 20240256.

## VERIFICATION OF THE METHOD FOR RECONSTRUCTION OF INDIVIDUALIZED EXTERNAL EXPOSURE DOSES TO PERSONS LIVING IN A CONTAMINATED TERRITORY WITH RADIONUCLIDES

D. B. KULIKOVICH<sup>a,b</sup>, N. G. VLASOVA<sup>c</sup>, Yu. V. VISENBERG<sup>a</sup>, B. K. KUZNETSOV<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Gomel State Medical University,  
5 Lange Street, Gomel 246000, Belarus

<sup>b</sup>International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,  
23/1 Daiŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

<sup>c</sup>Republican Research Center for Radiation Medicine and Human Ecology,  
290 Il'icha Street, Gomel 246040, Belarus

Corresponding author: D. B. Kulikovich (dimaproud@mail.ru)

Correct assessment of individual exposure doses to the population is an integral component for conducting radiation epidemiological studies to establish the dose-effect relationship and identify the most exposed groups of the population. At the same time, difficulties in assessing individual external exposure doses arise when there is a lack or absence of individual dosimetric control data. In this regard, the assessment of external exposure doses of persons living in areas contaminated with radionuclides is carried out by reconstructing the latter on the basis of official methodological documents. Due to the over conservative nature of exposure dose reconstruction methods, many of them simply don't correspond to the task of dose individualization, since they only allow estimating average values within a locality, and many lead to significant errors of 300 % or more. Based on the above, we have previously developed and proposed a new method for reconstructing individualized external exposure dose, which allows us to take into account not only the direct factor of dose formation – the surface contamination density by  $^{137}\text{Cs}$ , but also «indirect» factors, such as occupation, gender and age of the individual. To assess the adequacy of the method we developed and the possibility of using it to reconstruct individualized external radiation doses we carried out its verification. A research sample was formed based on individual dosimetric control data of residents

of the Mogilev region for 2005 and 2006. The sample was formed taking into account the representativeness by type of occupation of the rural population, by gender and age, which have a statistically justified influence on the formation of the individual external exposure dose. The result of a comparative analysis of reconstructed doses with IDC data showed that for the sample as a whole for each year and for occupational groups, the estimated data and IDC data are completely comparable, the estimation error did not exceed 11 %. Thus, verification of the developed method for reconstructing individual external exposure doses to persons living in a radioactively contaminated area showed that the proposed method can be used when there is insufficient amount of IDC data or, in their absence, to predict individual external exposure doses to persons living in a radioactively contaminated area.

**Keywords:** external exposure dose; individual dosimetric control; individualized dose; informative factor-sign; occupational group; regression model.

**Acknowledgments.** The work was carried out within the framework of research work on the topic «Development and implementation of a method for assessing and predicting individualized accumulated radiation doses of persons exposed to radiation as a result of the Chernobyl accident and living in a radioactively contaminated area» of the State program for eliminating the consequences of the disaster at the Chernobyl accident at 2021–2025 Republic of Belarus. Reg. No. 20240256.

## Введение

Надежная оценка эффектов радиационного воздействия на здоровье человека и популяции в целом не может быть получена без знания индивидуальных доз облучения. В связи с этим для изучения исследований медико-биологических последствий аварии на Чернобыльской атомной электростанции необходимо уделять особое внимание реконструкции индивидуализированных доз облучения, поскольку наличие или отсутствие эффектов может быть доказано путем проведения радиационно-эпидемиологических исследований [1]. Для обеспечения проведения такого рода исследований необходимо применять адекватные методические подходы реконструкции доз, поскольку большинство методик базируются исключительно на прямых факторах дозоформирования и не учитывают социально обусловленное поведение индивида, что, в конечном счете, приводит к неоднозначности оценки последней, так как именно индивид и его социально-демографические параметры – «ведущий фактор» дозоформирования [2; 3].

Ранее было статистически обосновано и доказано, что индивидуальная доза внешнего облучения зависит не только от плотности загрязнения радионуклидами территории проживания и жизнедеятельности индивида, но и от профессиональной занятости, пола и возраста индивида в совокупности [4–6].

Индивидуальный дозиметрический контроль (далее – ИДК) – лучший способ получить информацию о дозе облучения людей с точки зрения точности и надежности. Однако на практике сложно собрать данные о дозах облучения лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС за весь послеаварийный период [7–9]. В таких ситуациях реконструкция доз осуществляется с применением соответствующих методик<sup>1–6</sup>, которые в большинстве случаев являются сверхконсервативными и не соответствуют задаче индивидуализации доз, поскольку ошибки оценочных параметров могут достигать 300 % и более [10; 11].

Вышеизложенное определяет необходимость прогнозной оценки доз с использованием статистического моделирования, в связи с чем был разработан новый метод реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории в результате аварии на Чернобыльской АЭС [12]. В основе разработанного метода – уравнение, полученное методом множественной линейной регрессии, которое учитывает как прямой фактор дозоформирования – плотность поверхностного загрязнения территории населенного пункта (далее – НП) по <sup>137</sup>Cs, так и косвенные факторы (профессиональную занятость, пол и возраст индивида).

<sup>1</sup>МУ 2.6.1.2004-05. Реконструкция средней (индивидуализированной) накопленной эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году (Дополнение 2 к МУ 2.6.1.579-96). Москва: Роспотребнадзор, 2005. 11 с.

<sup>2</sup>МУ 2.6.1.579-96. Реконструкция средней накопленной в 1986–2001 гг. эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов Российской Федерации, подвергшихся радиоактивному загрязнению вследствие аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году. Москва: Роспотребнадзор, 1996. 8 с.

<sup>3</sup>Определение годовой суммарной эффективной дозы облучения жителей населенных пунктов РБ, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС: методические указания. Минск: Минздрав РБ, 1996. 12 с.

<sup>4</sup>Оценка эффективной дозы внешнего и внутреннего облучения лиц, которые проживают на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС: методические указания. Минск: Минздрав РБ, 2003. 14 с.

<sup>5</sup>Метод реконструкции индивидуализированных накопленных доз облучения включенных в Государственный регистр лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС, других радиационных аварий. Инструкция по применению: утв. Министерством здравоохранения Республики Беларусь 12.12.2014 г., № 095-0914. Гомель: РНПЦ РМиЭЧ, 2014. 9 с.

<sup>6</sup>МУ 2.6.1.3295-15. Получение индивидуальных накопленных доз с использованием содержащихся в региональной базе данных доз облучения населения: методические указания. Москва: Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2015. 21 с.

Цель исследования – провести верификацию разработанного метода реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

Материалы и методы исследования

Материалами исследования явились «База данных накопленных эффективных доз облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь», рег. свидетельство № 5870900638 от 21.05.2009, «База данных плотности загрязнения территории населенных пунктов Республики Беларусь радионуклидами цезия, стронция и плутония по состоянию на 1986 год», рег. свидетельство № 58709000639 от 20.05.2009.

Верификация метода [12], при разработке которого были использованы данные индивидуального дозиметрического контроля, полученные методом термолюминесцентной дозиметрии жителей Гомельской обл. за период с 1988 по 1995 год, проводилась по сформированной выборке (n = 225 чел.) для лиц молодого и среднего возраста по классификации Всемирной организации здравоохранения [13], проживающих в населенных пунктах, находящихся на территории с примерно одинаковым уровнем загрязнения по <sup>137</sup>Cs Костюковичского, Краснопольского, Славгородского и Чериковского р-нов Могилевской обл., за 2005 и 2006 годы. Выбор исследуемого временного периода обоснован тем, что для корректного проведения ИДК необходимо соблюдать ряд условий, в том числе и плотность поверхностного загрязнения <sup>137</sup>Cs выше 444 кБк/м². В связи с этим не всегда есть возможность выполнения данной трудоемкой процедуры<sup>7</sup>.

Выборка сформирована с учетом представительности по типу профессиональной занятости сельского населения, по полу и возрасту, которые статистически обоснованно оказывают влияние на формирование индивидуальной дозы внешнего облучения [6; 9].

Реконструкция индивидуализированных доз внешнего облучения проводилась по разработанному методу [12] как для каждого индивида за каждый исследуемый год, так и для групп профессиональной занятости в отдельности (далее – ГПЗ) на основе уравнения:

$$E_i^{ext} = K_{reduce_j} \cdot e^{(b_i + [k_{1_i} \cdot \ln(\frac{\sigma}{37})] + [k_{2_i} \cdot G] + [k_{3_i} \cdot A])},$$

где  $E_i^{ext}$  – индивидуализированная годовая доза внешнего облучения лица, относящегося к соответствующей  $i$ -той группе профессиональной занятости, мЗв·год<sup>-1</sup> [9] (табл. 1);

$K_{reduce_j}$  – коэффициент снижения дозы внешнего облучения для  $j$ -того типа населенного пункта, отн. ед;

$b_i$  – свободный член уравнения регрессии для  $i$ -той группы профессиональной занятости, мЗв·год<sup>-1</sup>;

$k_{1_i}, k_{2_i}, k_{3_i}$  – коэффициенты регрессии, соответствующие каждому объясняющему фактору для  $i$ -той группы профессиональной занятости, отн.ед.;

$\sigma$  – плотность загрязнения территории по <sup>137</sup>Cs исследуемого населенного пункта, кБк·м<sup>-2</sup>;

$G$  – гендерная принадлежность индивида (используется бинарная классификация: 0 – лица женского пола, 1 – лица мужского пола);

$A$  – возраст индивида, количество полных лет.

Таблица 1

Группы профессиональной занятости

Table 1

Occupational groups

| Код группы | Тип занятости в социуме                                                  |
|------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1*         | Дошкольник, школьники младших и старших классов                          |
| 2*         | Инвалид, пенсионер, безработный, домохозяйка                             |
| 3*         | Студент, служащий, военнослужащий, медицинский работник                  |
| 4*         | Водитель, механизатор, животновод, работник сельского хозяйства, рабочий |
| 5*         | Полевод                                                                  |
| 6*         | Работник лесхоза                                                         |

\* Результаты апостериорного сравнения групп ( $p < 0,05$ ).

<sup>7</sup>Методика выполнения измерений индивидуальных доз с помощью термолюминесцентного дозиметрического комплекта на основе детекторов Al O, для решения задач прикладного ИДК: методические рекомендации: ИБФ МЗ СССР, инв. № Б-5454, Москва: ИБФ МЗ СССР, 1991. 28 с.

Выявленные ранее группы профессиональной занятости в сформированной выборке представлены следующим образом: ГПЗ 3 – служащие административного аппарата, дозиметрист, врач, фельдшер, лаборант и санитарка; ГПЗ 4 – агроном, водитель, животновод, зоотехник, рабочий, тракторист, механизатор; ГПЗ 5 – полевод.

Статистическая обработка данных проводилась методами прикладной статистики с использованием *MS Excel* и программного пакета для статистического анализа *Statistica 12.0* (StatSoft, USA). Для данных, распределение которых отлично от нормального, в качестве описательных статистик рассчитывали медиану, нижний и верхний квартили индивидуальной / индивидуализированной дозы внешнего облучения. Сравнение двух выборок осуществляли непараметрическим тестом Вилкоксона (W). Сила линейной корреляционной связи между двумя выборками определялась непараметрическим тестом Спирмена (R) [14]. Уровень значимости принят равным 0,05.

### Результаты исследования и их обсуждение

Проведена реконструкция индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на территории Могилевской обл. за 2005 и 2006 годы (данные ИДК предоставлены УЗ «Краснопольский районный ЦГЭ», УЗ «Чериковский районный ЦГЭ», УЗ «Славгородский районный ЦГЭ» и УЗ «Костюковичский районный ЦГЭ») с применением нового методического подхода, который позволяет учесть не только прямой фактор дозоформирования (плотность поверхностного загрязнения территории НП по  $^{137}\text{Cs}$ ), но и косвенные факторы – профессиональная занятость, пол и возраст индивида. Как было показано ранее [12], учет всех дозоформирующих факторов позволяет не только отойти от консервативных подходов реконструкции доз, но и обеспечивает повышение точности прогноза, снижая ошибки оценки последних.

Для проведения сравнительного анализа реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения с данными ИДК были оценены основные параметры распределения индивидуальной дозы внешнего облучения лиц исследовательской выборки (табл. 2).

Таблица 2

Статистические параметры исследовательской выборки по данным ИДК

Table 2

Statistical parameters of the research sample according to IDC data

| Параметр         | Доза внешнего облучения, мЗв/год |                    |                    |
|------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|
|                  | По выборке                       | Лица мужского пола | Лица женского пола |
| 2005 г.          |                                  |                    |                    |
| Медиана          | 0,26                             | 0,26               | 0,26               |
| Нижний квартиль  | 0,23                             | 0,23               | 0,25               |
| Верхний квартиль | 0,30                             | 0,30               | 0,30               |
| 2006 г.          |                                  |                    |                    |
| Медиана          | 0,21                             | 0,21               | 0,24               |
| Нижний квартиль  | 0,20                             | 0,20               | 0,23               |
| Верхний квартиль | 0,28                             | 0,28               | 0,26               |

В табл. 3 представлен фрагмент реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения лиц из сформированной выборки и соответствующие им данные ИДК.

Как следует из табл. 3, реконструированные индивидуализированные дозы внешнего облучения фактически не отличаются от данных ИДК: за 2005 г. ошибка оценки составила в среднем  $\sim 10\%$  ( $W = 2305$ ;  $p = 0,93$ ), а за 2006 г.  $\sim 9\%$  ( $W = 2241$ ;  $p = 0,87$ ), при этом коэффициенты корреляции Спирмена для каждого периода достаточно высоки ( $R = 0,78$ ;  $p < 0,0001$ ) и ( $R = 0,86$ ;  $p < 0,0001$ ) соответственно. Результат корреляционного анализа представлен на рис. 1, 2.

Таблица 3

Реконструированные индивидуализированные дозы внешнего облучения

Table 3

Reconstructed individualized external expose doses

|    | Год<br>ИДК | Район          | Пол | Возраст,<br>лет | Профессия         | ГПЗ | Доза внешнего<br>облучения, мЗв/год |      | Ошибка<br>оценки, % |
|----|------------|----------------|-----|-----------------|-------------------|-----|-------------------------------------|------|---------------------|
|    |            |                |     |                 |                   |     | Метод*                              | ИДК  |                     |
| 1  | 2005       | Краснопольский | М   | 23              | Животновод        | 4   | 0,21                                | 0,21 | 2                   |
| 2  | 2005       | Краснопольский | М   | 34              | Тракторист        | 4   | 0,22                                | 0,20 | 8                   |
| 3  | 2005       | Краснопольский | М   | 52              | Тракторист        | 4   | 0,23                                | 0,24 | 4                   |
| 4  | 2005       | Краснопольский | М   | 58              | Водитель          | 4   | 0,24                                | 0,20 | 18                  |
| 5  | 2005       | Костюковичский | Ж   | 54              | Зав. складом      | 3   | 0,22                                | 0,19 | 18                  |
| 6  | 2005       | Костюковичский | М   | 59              | Начальник участка | 3   | 0,06                                | 0,05 | 25                  |
| 7  | 2005       | Костюковичский | Ж   | 41              | Полевод           | 5   | 0,27                                | 0,24 | 14                  |
| 8  | 2005       | Костюковичский | М   | 37              | Агроном           | 4   | 0,22                                | 0,23 | 5                   |
| 9  | 2005       | Костюковичский | М   | 48              | Тракторист        | 4   | 0,23                                | 0,21 | 9                   |
| 10 | 2005       | Славгородский  | Ж   | 39              | Дозиметрист       | 3   | 0,27                                | 0,25 | 9                   |
| 11 | 2005       | Славгородский  | Ж   | 32              | Фельдшер          | 3   | 0,27                                | 0,27 | 1                   |
| 12 | 2005       | Славгородский  | Ж   | 31              | Полевод           | 5   | 0,32                                | 0,30 | 5                   |
| 13 | 2005       | Славгородский  | М   | 44              | Животновод        | 4   | 0,32                                | 0,31 | 4                   |
| 14 | 2005       | Славгородский  | М   | 57              | Зоотехник         | 4   | 0,34                                | 0,39 | 13                  |
| 15 | 2005       | Чериковский    | М   | 42              | Тракторист        | 4   | 0,26                                | 0,24 | 9                   |
| 16 | 2005       | Чериковский    | М   | 43              | Тракторист        | 4   | 0,26                                | 0,29 | 9                   |
| 17 | 2005       | Чериковский    | М   | 21              | Тракторист        | 4   | 0,24                                | 0,25 | 4                   |
| 18 | 2005       | Чериковский    | М   | 24              | Тракторист        | 4   | 0,24                                | 0,26 | 6                   |
| 19 | 2006       | Краснопольский | М   | 24              | Тракторист        | 4   | 0,20                                | 0,19 | 7                   |
| 20 | 2006       | Краснопольский | М   | 46              | Водитель          | 4   | 0,22                                | 0,20 | 9                   |
| 21 | 2006       | Краснопольский | М   | 46              | Механизатор       | 4   | 0,22                                | 0,20 | 11                  |
| 22 | 2006       | Краснопольский | Ж   | 36              | Животновод        | 4   | 0,21                                | 0,19 | 10                  |
| 23 | 2006       | Краснопольский | Ж   | 48              | Животновод        | 4   | 0,22                                | 0,20 | 9                   |
| 24 | 2006       | Костюковичский | Ж   | 35              | Полевод           | 5   | 0,26                                | 0,24 | 8                   |
| 25 | 2006       | Костюковичский | Ж   | 55              | Зав. складом      | 3   | 0,22                                | 0,20 | 10                  |
| 26 | 2006       | Костюковичский | М   | 40              | Агроном           | 4   | 0,22                                | 0,20 | 9                   |
| 27 | 2006       | Костюковичский | М   | 39              | Водитель          | 4   | 0,22                                | 0,20 | 9                   |
| 28 | 2006       | Славгородский  | Ж   | 44              | Полевод           | 5   | 0,34                                | 0,34 | 2                   |
| 29 | 2006       | Славгородский  | Ж   | 54              | Санитарка         | 3   | 0,28                                | 0,26 | 7                   |
| 30 | 2006       | Славгородский  | М   | 39              | Тракторист        | 4   | 0,31                                | 0,30 | 4                   |
| 31 | 2006       | Славгородский  | М   | 45              | Животновод        | 4   | 0,32                                | 0,30 | 7                   |
| 32 | 2006       | Чериковский    | М   | 34              | Полевод           | 5   | 0,26                                | 0,24 | 10                  |
| 33 | 2006       | Чериковский    | М   | 23              | Полевод           | 5   | 0,25                                | 0,24 | 4                   |
| 34 | 2006       | Чериковский    | М   | 22              | Тракторист        | 4   | 0,24                                | 0,21 | 14                  |
| 35 | 2006       | Чериковский    | М   | 28              | Тракторист        | 4   | 0,24                                | 0,22 | 11                  |
| 36 | 2006       | Чериковский    | М   | 37              | Тракторист        | 4   | 0,25                                | 0,23 | 10                  |

\*Для удобства восприятия реконструированные индивидуализированные дозы внешнего облучения представлены с точностью до сотых.

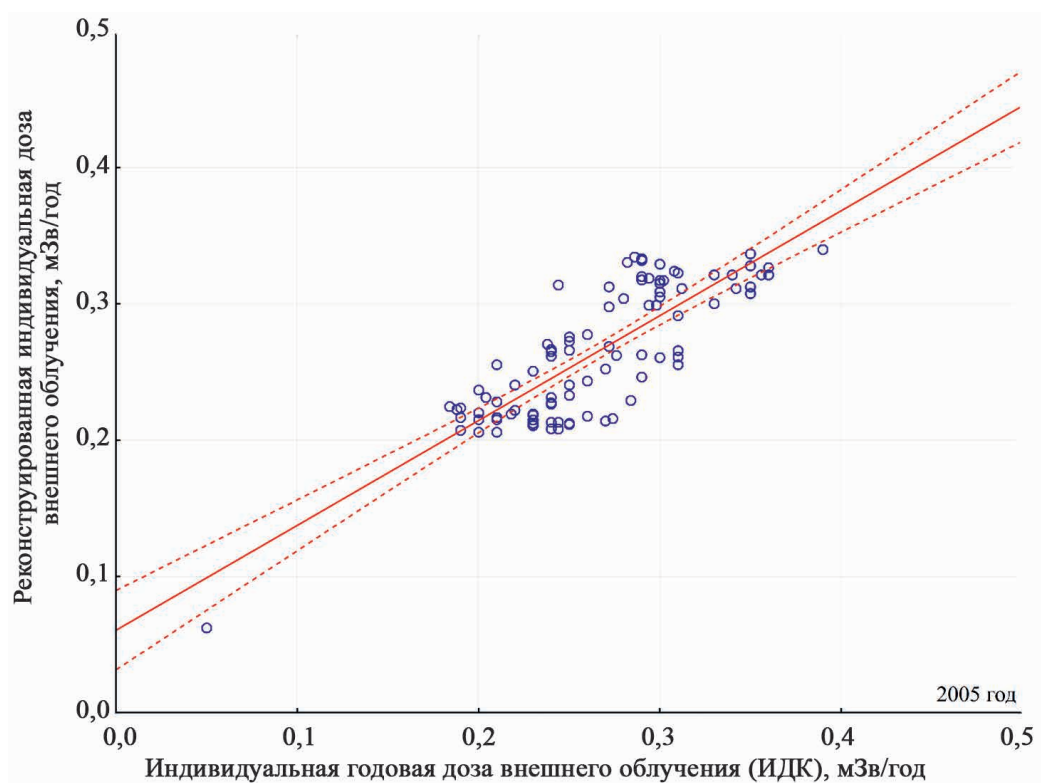


Рис. 1. Результат корреляционного анализа реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения с данными ИДК (2005 г.)

Fig. 1. The result of correlation analysis of the reconstructed of individualized external exposure doses with IDC-data (2005)

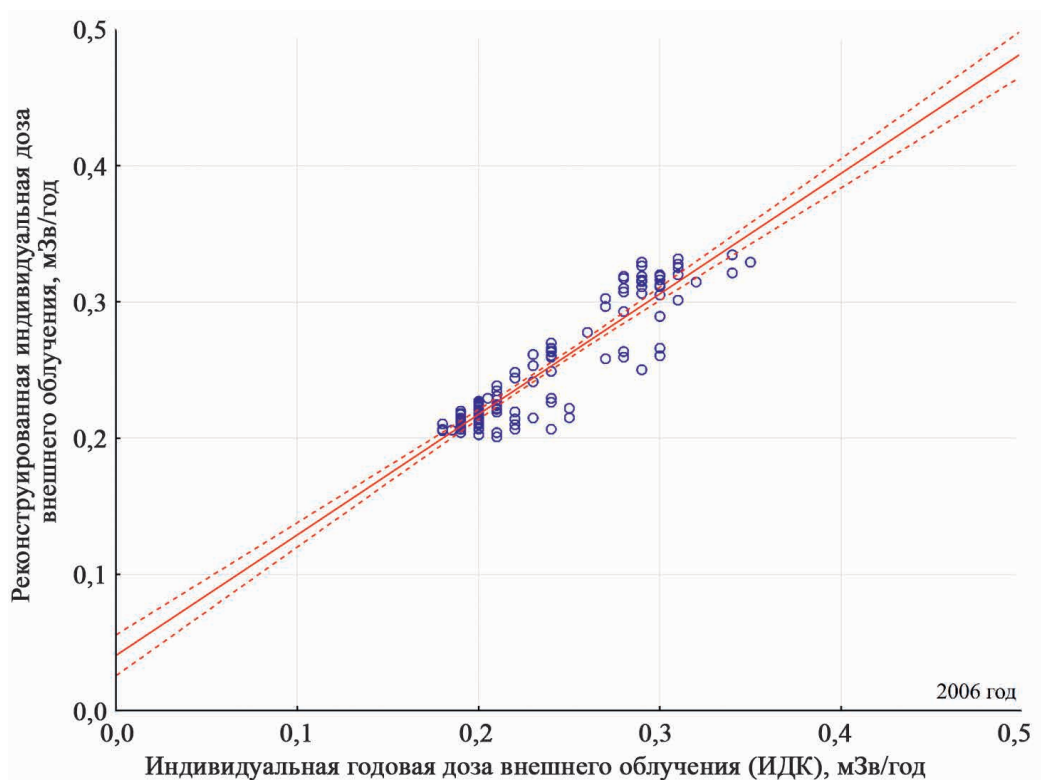


Рис. 2. Результат корреляционного анализа реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения с данными ИДК (2006 г.)

Fig. 2. The result of correlation analysis of the reconstructed of individualized external exposure doses with IDC-data (2006)

Далее были оценены параметры распределения индивидуальной дозы внешнего облучения в группах профессиональной занятости по данным ИДК и проведен сравнительный анализ реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения в соответствующих группах профессиональной занятости по сформированной выборке. Результат сравнительного анализа представлен в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительный анализа параметров распределения реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения по группам профессиональной занятости с данными ИДК

Table 4

Comparative analysis of the distribution parameters of reconstructed individualized external exposure doses by occupational groups with IDC data

| Параметр                              | Реконструированная доза внешнего облучения<br>в группах профессиональной занятости, мЗв/год** |      |       |      |       |      |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|------|-------|------|
|                                       | ГПЗ 3                                                                                         |      | ГПЗ 4 |      | ГПЗ 5 |      |
|                                       | Метод                                                                                         | ИДК  | Метод | ИДК  | Метод | ИДК  |
| 2005 г.                               |                                                                                               |      |       |      |       |      |
| Медиана                               | 0,27                                                                                          | 0,25 | 0,25  | 0,27 | 0,27  | 0,29 |
| Нижний квартиль                       | 0,24                                                                                          | 0,21 | 0,22  | 0,23 | 0,26  | 0,24 |
| Верхний квартиль                      | 0,27                                                                                          | 0,26 | 0,31  | 0,30 | 0,30  | 0,31 |
| Коэффициент корреляции Спирмена (R) * | 0,77                                                                                          |      | 0,72  |      | 0,72  |      |
| Ошибка оценки, %                      | ~ 11                                                                                          |      | ~ 10  |      | ~ 9   |      |
| 2006 г.                               |                                                                                               |      |       |      |       |      |
| Медиана                               | 0,27                                                                                          | 0,24 | 0,22  | 0,21 | 0,26  | 0,24 |
| Нижний квартиль                       | 0,26                                                                                          | 0,23 | 0,21  | 0,20 | 0,26  | 0,24 |
| Верхний квартиль                      | 0,27                                                                                          | 0,25 | 0,30  | 0,28 | 0,29  | 0,30 |
| Коэффициент корреляции Спирмена (R) * | 0,79                                                                                          |      | 0,83  |      | 0,85  |      |
| Ошибка оценки, %                      | ~ 11                                                                                          |      | ~ 9   |      | ~ 6   |      |

\*  $p < 0,05$ ;  
\*\* для удобства восприятия реконструированные индивидуализированные дозы внешнего облучения представлены с точностью до сотых.

Как следует из табл. 4, согласованность реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения с данными ИДК в группах профессиональной занятости также находится на высоком уровне, о чем свидетельствуют коэффициенты корреляции Спирмена. При этом ошибка оценки сохранилась на том же уровне, что и для выборки в целом.

Проведенная верификация свидетельствует об адекватности выбранного метода реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения. Адекватность метода обеспечена учетом информативных фактор-признаков (профессиональная занятость, пол и возраст индивида). Это позволяет корректно, с достаточно высокой точностью оценить индивидуализированные дозы внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории.

Заключение

Проведена верификация метода реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории, в отдаленном периоде после аварии на ЧАЭС.

По результатам сравнительного анализа реконструированных индивидуализированных доз внешнего облучения с данными ИДК было установлено, что между рассчитанными дозами и данными ИДК, как для всей выборки, так и для групп профессиональной занятости наблюдается высокая корреляционная связь, при этом ошибка оценки не превышает ~11 %.

Таким образом, разработанный метод реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на радиоактивно загрязненной территории, может быть использован при

недостаточном количестве данных ИДК, либо при их отсутствии. Он позволит прогнозировать индивидуальные дозы внешнего облучения для проведения радиационно-эпидемиологических исследований по выявлению наиболее облучаемых групп населения для оказания им в дальнейшем специализированной медицинской помощи.

### Библиографические ссылки

1. Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes (Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group «Health»). Geneva: WHO Press; 2006. 182 p. <https://www.who.int/publications/i/item/9241594179>
2. Skryabin AM, Savkin MN, Grinev M, Robinson CA, Prosser SL, Jones KA. Distribution of doses received in rural areas affected by the Chernobyl accident. *Didcot: National Radiological Protection Board*; 1995. 52 p.
3. Allen PT, Archangelskaya GV, Belyaev ST, Demin VF, Drottz-Sjoberg BM, Hedemann-Jenson P. Optimization of health protection of the public following a major nuclear accident: interaction between radiation protection and social and psychological factors. *Health Physics*. 1996;71(5):763–765. DOI: 10.1097/00004032-199611000-00019
4. Golikov VYu, Balonov MI, Jacob P. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident. *Biophysics*. 2002;41(10):185–193. DOI: 10.1007/s00411-002-0167-2
5. Vlasova NG, Rozhko AV, Visenberg YuV, Drozd EA. Dose Assessment in Population Living on Contaminated Territories at the Remote Period after the Chernobyl Accident. In: International Conference on Global Emergency Preparedness and Response. International Atomic Energy Agency (IAEA). Book of Synopses. IAEA Headquarters, Vienna, Austria, 19–23 October 2015. Reference No: CN-213. 2015;250–255.
6. Куликович ДБ, Власова НГ. Выявление однородных по дозе внешнего облучения групп жителей загрязненных территорий по совокупности информативных фактор-признаков. *Проблемы здоровья и экологии*. 2023;20(1):123–130. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2023-20-1-15>.
7. Матарас АН, Эвентова ЛН, Висенберг ЮВ, Власова НГ. Методический подход оценки индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на ЧАЭС. *Проблемы здоровья и экологии*. 2014;40(2):91–96. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2014-11-2-19>.
8. Muller H, Prohl G. Ecosys-87: A Dynamic Model for Assessing Radiological Consequences of Nuclear Accidents. *Health Physics*. 1993;63(3):232–252. DOI: 10.1097/00004032-199303000-00002.
9. Куликович ДБ, Власова НГ. Статистический анализ факторов, оказывающих влияние на формирование дозы внешнего облучения. *Проблемы здоровья и экологии*. 2022;19(3):99–105. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2022-19-3-14>
10. International Atomic Energy Agency. Working papers of the TC project RER/9/074 «Radiation monitoring of public exposure in the remote period after the accident at the Chernobyl nuclear power plant». Vienna: IAEA; 2007.
11. Likhtariov I, Kovgan L, Novak D, Vavilov S, Jacob P, Paretzke HG. Effective doses due to external irradiation from the Chernobyl accident for different population groups of Ukraine. *Health Physics*. 1996;70(1):87–98. DOI: 10.1097/00004032-199601000-00013.
12. Куликович ДБ, Власова НГ, Висенберг ЮВ, Кузнецов БК. Метод реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на загрязненной радионуклидами территории вследствие аварии на ЧАЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;1:46–57. DOI: <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-46-57>.
13. Козлова ОА, Секички-Павленко ОО. Теоретические основания определения возрастных границ и возрастной структуры населения в контексте демографического старения. *AlterEconomics*. 2022;19(3):442–463. DOI: <https://doi.org/10.31063/AlterEconomics/2022.19-3.3>
14. Матицкий СЭ, Шитиков ВК. *Статистический анализ и визуализация данных с помощью R*. Москва: ДМК Пресс; 2015. 496 с.

### References

1. Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes (Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group «Health»). Geneva: WHO Press; 2006. 182 p. <https://www.who.int/publications/i/item/9241594179>
2. Skryabin AM, Savkin MN, Grinev M, Robinson CA, Prosser SL, Jones KA. Distribution of doses received in rural areas affected by the Chernobyl accident. *Didcot: National Radiological Protection Board*; 1995. 52 p.
3. Allen PT, Archangelskaya GV, Belyaev ST, Demin VF, Drottz-Sjoberg BM, Hedemann-Jenson P. Optimization of health protection of the public following a major nuclear accident: interaction between radiation protection and social and psychological factors. *Health Physics*. 1996;71(5):763–765. DOI: 10.1097/00004032-199611000-00019
4. Golikov VYu, Balonov MI, Jacob P. External Exposure of the Population Living in Areas of Russia Contaminated due to the Chernobyl Accident. *Biophysics*. 2002;41(10):185–193. DOI: 10.1007/s00411-002-0167-2
5. Vlasova NG, Rozhko AV, Visenberg YuV, Drozd EA. Dose Assessment in Population Living on Contaminated Territories at the Remote Period after the Chernobyl Accident. In: International Conference on Global Emergency Preparedness and Response. International Atomic Energy Agency (IAEA). Book of Synopses. IAEA Headquarters, Vienna, Austria, 19–23 October 2015. Reference No: CN-213. 2015;250–255.
6. Kulikovich DB, Vlasova NG. *Vyyavlenie odnorodnyh po doze vneshnego oblucheniya grupp zhitelej zagryaznennyh territorij po sovokupnosti informativnyh faktor-priznakov* [Identification of groups of residents in contaminated territories homogeneous in the external exposure dose by a set of informative factors-signs]. *Health and Ecology Issues*. 2023;20(1):123–130. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2023-20-1-15>. Russian.
7. Mataras AN, Eventova LN, Visenberg YuV, Vlasova NG. *Metodicheskij podhod ocenki individualizirovannyh doz vneshnego oblucheniya lic, podvergnihysya vozdeystviyu radiatsii vsledstvie katastrofy na CHAES* [Methodological approach to the assessment of individualized external dose in people affected after the Chernobyl accident]. *Health and Ecology Issues*. 2014;40(2):91–96. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2014-11-2-19>. Russian.
8. Muller H, Prohl G. Ecosys-87: A Dynamic Model for Assessing Radiological Consequences of Nuclear Accidents. *Health Physics*. 1993;63(3):232–252. DOI: 10.1097/00004032-199303000-00002.

9. Kulikov DB, Vlasova NG. *Statisticheskij analiz faktorov, okazyvayushchih vliyanie na formirovanie dozy vneshnego oblucheniya* [Statistical analysis of factors contributing to the formation of the external exposure dose]. *Health and Ecology*. 2022;19(3):99–105. <https://doi.org/10.51523/2708-6011.2022-19-3-14>. Russian.
10. International Atomic Energy Agency. Working papers of the TC project RER/9/074 «Radiation monitoring of public exposure in the remote period after the accident at the Chernobyl nuclear power plant». Vienna: IAEA; 2007.
11. Likhtariov I, Kovgan L, Novak D, Vavilov S, Jacob P, Paretzke HG. Effective doses due to external irradiation from the Chernobyl accident for different population groups of Ukraine. *Health Physics*. 1996;70(1):87–98. DOI: 10.1097/00004032-199601000-00013.
12. Kulikov DB, Vlasova NG, Visenberg YuV, Kuznetsov BK. *Metod rekonstrukcii individualizirovannyh doz vneshnego oblucheniya lic, prozhivayushchih na zagrjaznennoj radionuklidami territorii vsledstvie avarii na ChAJeS* [Method for reconstructing individualized external exposure dose of persons living in a contaminated area with radionuclides as a result of the Chernobyl accident]. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;1:46–57. DOI: <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-46-57>. Russian.
13. Kozlova OA, Sekicki-Pavlenko OO. *Teoreticheskie osnovaniya opredeleniya vozrastnyh granic i vozrastnoj struktury naselenija v kontekste demograficheskogo starenija* [Theoretical grounds for determining age boundaries and age structure of the population in the context of demographic aging]. *AlterEconomics*. 2022;19(3):442–463. DOI: <https://doi.org/10.31063/AlterEconomics/2022.19-3.3>. Russian.
14. Masticzkij SE, Shitikov VK. *Statisticheskij analiz i vizualizaciya dannyh s pomoshch'yu R* [Statistical analysis and Data visualization using R]. Moscow: DMK Press; 2015. 496 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 28.05.2024.  
Received by editorial board 28.05.2024.

УДК 576.54:616.216-006

## ХАРАКТЕРИСТИКА ЭФФЕКТОРНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЦИТОТОКСИЧНОСТИ ЛИМФОИДНЫХ КЛЕТОК У ПАЦИЕНТОВ С СИНОНАЗАЛЬНЫМИ НОВООБРАЗОВАНИЯМИ

Е. М. НАЗАРЕНКО<sup>1), 2)</sup>, Н. А. МОРОЗОВА<sup>3)</sup>, А. В. ВЕЛИЧКО<sup>1), 2)</sup>, Ж. В. КОЛЯДИЧ<sup>3)</sup>, Д. Б. НИЖЕГОРОВА<sup>1), 2)</sup>

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

<sup>2)</sup>НИИ экспериментальной и клинической медицины, Белорусский государственный медицинский университет,  
аэрогородок Лесной, 223040, Минский район, Беларусь

<sup>3)</sup>Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова,  
аэрогородок Лесной, 223040, Минский район, Беларусь

---

### Образец цитирования:

Назаренко ЕМ, Морозова НА, Величко АВ, Колядич ЖВ, Нижегородова ДБ. Характеристика эффекторных механизмов цитотоксичности лимфоидных клеток у пациентов с синоназальными новообразованиями. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;3:69–79.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-69-79>

### For citation:

Nazaranka EM, Marozava NA, Vialichka AV, Kolyadich JV, Nizheharodava DB. Characteristics of lymphoid cell effector cytotoxicity mechanisms in patients with sinonasal neoplasms. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;3:69–79. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-69-79>

---

### Авторы:

**Елизавета Максимовна Назаренко** – магистрант кафедры иммунологии<sup>1</sup>; младший научный сотрудник отдела иммунологии и биомедицинских технологий научно-исследовательской лаборатории<sup>2</sup>.

**Наталья Алексеевна Морозова** – врач онколог-хирург отделения опухолей головы и шеи.

**Алеся Валерьевна Величко** – аспирант кафедры иммунологии<sup>1</sup>; младший научный сотрудник отдела иммунологии и биомедицинских технологий научно-исследовательской лаборатории<sup>2</sup>.

**Жанна Викторовна Колядич** – доктор медицинских наук, профессор; заведующий лабораторией онкопатологии центральной нервной системы с группой онкопатологии головы и шеи.

**Дарья Борисовна Нижегородова** – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры иммунологии<sup>1</sup>; ведущий научный сотрудник отдела иммунологии и биомедицинских технологий научно-исследовательской лаборатории<sup>2</sup>.

### Authors:

**Elizaveta M. Nazaranka**, master's student at the department of immunology<sup>a</sup>; junior researcher at the department of immunology and biomedicine technology, scientific research of laboratory<sup>b</sup>.  
[el.m.nazarenko@gmail.com](mailto:el.m.nazarenko@gmail.com)

**Natallia A. Morozova**, oncologist-surgeon, at the department of head and neck tumors.

**Alesia V. Vialichka**, postgraduate student at the department of immunology<sup>a</sup>; junior researcher at the department of immunology and biomedicine technology, scientific research of laboratory<sup>b</sup>.  
[alesjswirskay@mail.ru](mailto:alesjswirskay@mail.ru)

**Zhanna V. Kolyadich**, doctor of science (medicine), full professor; head of the laboratory of oncopathology of the central nervous system with a group of oncopathology of the head and neck.

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

[nzh@tut.by](mailto:nzh@tut.by)

Иммунный ответ на опухоли осуществляется преимущественно посредством эффекторных реакций цитотоксичности, позволяющим напрямую удалять трансформированные клетки организма. Среди защитных противоопухолевых механизмов преобладающим является грануло-опосредованная цитотоксичность, включающая высвобождение литических белков в иммунологический синапс между эффекторной клеткой и мишенью. Изучение особенностей реализации данного механизма цитотоксичности перспективно для поиска молекулярных биомаркеров динамики опухолевой малигнизации и разработки новых направлений таргетной иммунотерапии. В данной работе представлены результаты анализа экспрессии маркера дегрануляции LAMP-1/CD107a и внутриклеточной продукции гранзима В цитотоксическими лимфоидными клетками в ко-культурах с опухолевой клеточной линией K562 у пациентов с доброкачественными и злокачественными синоназальными новообразованиями, находившихся на лечении в отделении опухолей головы и шеи ГУ «Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова» в 2023–2024 гг. Группу сравнения составили пациенты с полипозным риносинуситом, контрольная группа представлена здоровыми лицами. Экспрессия маркеров определялась методом проточной цитофлуориметрии. В результате исследования выявлено увеличение количества НК-клеток и снижение количества Т-клеток в клеточных культурах у пациентов с доброкачественными и злокачественными синоназальными новообразованиями по сравнению с контрольной группой. Установлено увеличение экспрессии CD107a и внутриклеточной продукции гранзима В Т-клетками пациентов со злокачественными синоназальными новообразованиями в ко-культурах с K562 относительно контрольной группы, коррелирующее со степенью злокачественности заболевания ( $R = 0,48$ ,  $p = 0,009$  – для Т-клеток, экспрессирующих CD107, и  $R = 0,40$ ,  $p = 0,03$  – для клеток, продуцирующих гранзим В). При этом экспрессия CD107a и продукция гранзима В НК-клетками в ко-культурах с K562 статистически значимо снижалась у пациентов как с доброкачественными, так и со злокачественными новообразованиями. Полученные данные свидетельствуют о том, что у пациентов со злокачественными синоназальными новообразованиями эффекторные Т-клетки вовлекаются в противоопухолевый ответ, преимущественно используя механизм грануло-опосредованной цитотоксичности, позволяя рассматривать субпопуляции CD107a- и гранзим В-позитивных Т-клеток в качестве потенциальных прогностических маркеров малигнизации опухолевого процесса.

**Ключевые слова:** контактная цитотоксичность; лимфоидные клетки; лизосомально-ассоциированный мембранный белок-1; гранзим В; синоназальные новообразования; клеточная линия K562.

## CHARACTERISTICS OF LYMPHOID CELL EFFECTOR CYTOTOXICITY MECHANISMS IN PATIENTS WITH SINONASAL NEOPLASMS

E. M. NAZARANKA<sup>a,b</sup>, N. A. MAROZAVA<sup>c</sup>, A. V. VIALICHKA<sup>a,b</sup>, J. V. KOLYADICH<sup>c</sup>, D. B. NIZHEHARODAVA<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,  
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

<sup>b</sup>Research Institute of Experimental and Clinical Medicine, Belarusian State Medical University,  
agro-town Lesnoy, 223040, Minsk district, Belarus

<sup>c</sup>N. N. Alexandrov National Cancer Center of Belarus,  
agro-town Lesnoy, 223040, Minsk district, Belarus

Corresponding author: E. M. Nazaranka (el.m.nazarenko@gmail.com)

The immune response to tumors is primarily mediated through effector cytotoxic reactions, which enable the direct removal of transformed cells in the body. Granule-mediated cytotoxicity is one of the main protective antitumor mechanism, which includes the release of lytic proteins into the immunological synapse between the effector cell and the target. Studying the features of this cytotoxic mechanism is promising for identifying molecular biomarkers that can help track the progression of tumor malignancy and develop new approaches to targeted immunotherapy. This article presents the results of LAMP-1/CD107a expression and intracellular granzyme B production by cytotoxic lymphoid cells in co-cultures with tumor cell line K562 from patients with benign and malignant sinonasal tumors, who were treated in the department of head and neck tumors of the Republican Scientific and Practical Center of Oncology and Medical Radiology named after N. N. Alexandrov in 2023–2024. The comparison group consisted of patients with polypous rhinosinusitis, the control group was represented by healthy individuals. The expression of the markers was determined by flow cytometry. The study revealed an increase in the number of NK cells and a decrease in the number of T cells in cultures in patients with benign and malignant sinonasal neoplasms compared with the control group. An increase in the CD107a expression and intracellular granzyme B production by T cells from patients with malignant sinonasal neoplasms in co-cultures with K562 as compared with the control group was established, that correlates with the degree of disease malignancy ( $R = 0.48$ ,  $p = 0.009$  for T-cells expressing CD107, and  $R = 0.40$ ,  $p = 0.03$  for cells producing granzyme B). At the same time, the CD107a expression and the granzyme B production by NK-cells in co-cultures with K562 was significantly reduced in patients with both benign and malignant neoplasms. The obtained data indicates that effector T cells in patients with malignant sinonasal neoplasms are involved in the antitumor response,

predominantly using the mechanism of granule-mediated cytotoxicity, allowing to consider subpopulations of CD107a- and granzyme B-positive T cells as potential prognostic markers of malignancy of the tumor process.

**Keywords:** contact cytotoxicity; lymphoid cells; lysosomal-associated membrane protein-1; granzyme B; sinonasal neoplasms; K562 cell line.

## Введение

Термин «противоопухолевый иммунитет» относится к врожденным и адаптивным иммунным реакциям, позволяющим выявлять и уничтожать клетки организма, которые подверглись трансформации. При этом основной эффект защитной реакции, а именно гибель опухолевых клеток, реализуют преимущественно цитотоксические лимфоидные клетки, к которым относят собственно цитотоксические Т-лимфоциты и естественные киллеры (НК-клетки). Цитотоксические лимфоидные клетки могут вызывать гибель инфицированных или трансформированных клеток организма посредством направленного высвобождения литических гранул, содержащих перфорин и гранзимы, либо с помощью Fas-зависимой или TNF-медиированной индукции апоптоза. В то время как первый процесс протекает достаточно быстро, цитотоксичность, опосредованная рецепторами смерти, требует больше времени [1]. В цитотоксических Т-лимфоцитах гранулы синтезируются только после контакта со специфическим антигеном и клеточной активации, тогда как в НК-клетках цитотоксические гранулы образуются во время развития и таким образом обеспечивают быструю реакцию НК-клеток на угрозу онкогенности или инфекции [2].

Цитотоксичность, опосредованная гранулами, может привести к гибели клеток по двум механизмам. Во-первых, некротическая гибель клеток, вызванная быстрым осмотическим потоком через поры перфорина и разрывом мембраны. Второй – апоптоз-индуцированная гибель клеток, вызванная перфорин-опосредованным поглощением гранзима В в клетку-мишень [3; 4]. Гранзим В является наиболее эффективным членом семейства гранзимов и может индуцировать апоптоз в течение нескольких минут после доставки либо за счет прямого расщепления каспаз, либо за счет активации митохондриального пути апоптоза [5; 6]. После дегрануляции литические белки во внеклеточном пространстве становятся полностью функционально активными и могут взаимодействовать с плазматической мембраной как связанных мишеней, так и самих эффекторных клеток. Одним из механизмов защиты цитотоксических клеток от аутолиза является экстернализация ассоциированного с лизосомами белка LAMP-1 (lysosomal-associated membrane protein-1) / CD107a, который способен ингибировать связывание перфорина с собственной мембранной эффекторных клеток, тем самым предотвращая повреждения [7].

В настоящее время знания об особенностях противоопухолевого иммунитета лежат в основе разработки различных иммунотерапевтических стратегий. Основная причина интереса к иммунотерапевтическому подходу заключается в том, что большинство современных методов лечения рака основаны на препаратах, которые либо уничтожают делящиеся клетки, либо блокируют их деление, оказывая негативное воздействие на нормальные пролиферирующие клетки организма, в то время как иммунотерапия представляет собой опухоль-специфичный метод лечения. Таким образом, углубление знаний в области эффекторных механизмов цитотоксичности важны не только для улучшения существующих противораковых методов лечения на основе цитотоксических клеток, но и для поиска дополнительных терапевтических возможностей. Актуальным вопросом в иммуноонкологии остается также выявление потенциальных прогностических молекулярных маркеров прогрессирования и малигнизации новообразований, эффективности иммунотерапии, которые позволили бы персонифицировать лечение пациентов.

Среди всех новообразований большой интерес представляют синоназальные опухоли, которые входят в группу онкологических заболеваний с высокой распространенностью в мире, а Республика Беларусь находится в категории стран с повышенным риском развития таких патологий. Доброкачественные и злокачественные синоназальные новообразования представляют собой гетерогенную группу опухолей, локализация которых включает слизистые оболочки полости носа, рта, носоглотки и гортани. Заболевания оказывают серьезное влияние на качество жизни пациентов, что обусловлено, главным образом, относительно низкой реакцией на лечение и выраженной лекарственной устойчивостью. Выживаемость по-прежнему остается очень низкой, поскольку у 25 % пациентов наблюдается метастазирование в течение первых 5 лет после постановки диагноза [8]. Синоназальные новообразования имеют мультифакториальную этиологию, включая курение, злоупотребление алкоголем, загрязнение окружающей среды, инфицирование вирусом папилломы человека, недостаточность питания, иммунодефицит и наследственные заболевания [9].

Среди доброкачественных синоназальных новообразований большая часть приходится на инвертированную папиллому (ИП), которая обычно диагностируется на поздней стадии. ИП чаще встречается у взрослых, средний возраст постановки диагноза составляет 55 лет [10]. Предполагают, что вирус папилломы человека играет важную роль в патофизиологии ИП, при этом серотипы 6 и 11 чаще обнаруживаются при доброкачественном течении заболевания, а серотипы 16 и 18 связаны с сопутствующей дисплазией

высокой степени или карциномой, однако данные литературы остаются противоречивыми [11]. Механизм злокачественной трансформации ИП, которая находится в пределах 5–27 %, до сих пор четко не сформулирован. Считается, что воспаление, дисбаланс клеточной пролиферации и апоптоза, а также роль молекул межклеточной адгезии играют определенную роль в злокачественной трансформации. На сегодняшний день отсутствуют определенные гистологические параметры, которые могли бы предсказать злокачественную трансформацию при данном заболевании [12].

Злокачественные опухоли полости носа и придаточных пазух в 70 % случаев имеют эпителиальную природу, из них 80 % составляет плоскоклеточный рак головы и шеи [13]. На возникновение и прогрессирование синоназальной карциномы влияет нарушение регуляции микроокружения опухоли. В частности, подавленная иммунная система, изменения стромы, гипоксия и несбалансированный микробиом полости рта – все перечисленное способствует развитию и метастазированию злокачественных синоназальных новообразований [9; 13].

В связи с этим, целью данного исследования явилась характеристика эффекторных механизмов цитотоксичности лимфоидных клеток в ко-культурах с опухолевой линией K562 у пациентов со злокачественными и доброкачественными синоназальными новообразованиями.

### Материалы и методы исследования

Материалом исследования явились мононуклеары периферической крови (МПК), полученные из цельной венозной крови 19 пациентов (11 мужчин и 8 женщин), среди которых 8 пациентов со злокачественными новообразованиями (ЗНО) в возрасте 61,0 (53,3 ÷ 71,3) лет (3 мужчин и 5 женщин), 7 пациентов с ИП в возрасте 64,0 (39,0 ÷ 67,5) лет (5 мужчин и 2 женщины), находившихся на стационарном лечении в отделении опухолей головы и шеи ГУ «Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова», а также 4 пациента с полипозным риносинуситом в возрасте 45,5 (42,0 ÷ 49,3) лет (3 мужчины и 1 женщина), которые вошли в группу сравнения. Контрольную группу составили 10 здоровых лиц в возрасте 41,5 (20,0 ÷ 57,5) лет (5 мужчин и 5 женщин). Диагнозы подтверждались гистологическим исследованием биопсийного материала.

МПК выделяли с помощью центрифугирования разведенной в физиологическом растворе периферической крови на градиенте плотности Roti®Sep 1077 (Carl Roth, Германия). В качестве опухолевых клеток-мишеней использовали суспензионную перевиваемую клеточную линию K562 в логарифмической фазе роста.

Совместное культивирование МПК и K562 проводили в 96-луночном U-образном планшете в питательной среде RPMI-1640 (Gibco, Германия) с добавлением 10 % фетальной бычьей сыворотки (Gibco, Германия), 1 % антибиотика-антимикотика (Gibco, Германия), 1 % L-глутамина (Gibco, США) в соотношении соответственно, эффектор:мишень 6,25:1. Количество клеток-мишеней составило  $1 \times 10^4$  клеток на лунку. В качестве контролей использовали культуры K562 ( $1 \times 10^4$  клеток на лунку) или МПК ( $5 \times 10^5$  клеток на лунку). Ко-культивирование проводили в CO<sub>2</sub>-инкубаторе в течение 3-х суток в увлажненной атмосфере с 5 % CO<sub>2</sub> при 37 °C.

Для оценки степени дегрануляции цитотоксических клеток за 4 ч до конца инкубации в пробы добавляли монензин (Tocris Bioscience, Великобритания) в конечной концентрации 5 мкг/мл для ингибирования трансмембранного транспорта, после чего через 1 ч пробы окрашивали моноклональными антителами CD107a-PE (Beckman Coulter, Франция) согласно инструкции производителя. По окончании инкубации пробы переносили в пробирки для цитометра и окрашивали моноклональными антителами CD3-FITC и CD56-PC7 (Elabscience, Китай) в течение 15 мин в темноте при комнатной температуре согласно инструкции производителя. Учет результатов выполняли на 10 000 Т-лимфоцитов с использованием проточного цитометра CytoFlex (Beckman Coulter, США). NK- и Т-клетки гейтировали по положительной экспрессии маркеров CD56 и CD3 соответственно, среди гейта всех лимфоцитов.

Для количественного определения внутриклеточного гранзима В за 4 часа до конца инкубации добавляли 4 нг/мл форбол-12-миристата-13-ацетата (Sigma, Германия), 1 мкг/мл кальциевой соли иономицина и 10 мкг/мл брэфельдина А (Cayman Chemicals, США). После инкубации МПК окрашивали моноклональными антителами к поверхностным CD3-FITC и CD56-PE (Elabscience, Китай) согласно инструкции производителя в течение 15 мин в темноте при комнатной температуре, фиксировали 4 % параформальдегидом (Sigma, Германия), пермеабелизировали 2 % Triton X («Sigma», Германия), а затем проводили внутриклеточное окрашивание с использованием моноклональных антител Granzyme B-APC (BioLegend, США) согласно инструкции производителя. Учет результатов выполняли на 10 000 Т-лимфоцитов.

Статистическую обработку данных проводили в программе STATISTICA 8.0. Для описательной статистики использовали значение медианы и значения 25 и 75 % процентилей. Определение статистически значимых различий для зависимых переменных осуществляли непараметрическим критерием Вилкоксона (р (W)), для независимых – критерием Манна – Уитни (р (M-W)). Для выявления корреляционной связи

количественных признаков использовали ранговый коэффициент корреляции непараметрических данных Спирмена (R). Во всех случаях результаты принимали достоверными при уровне значимости  $p < 0,05$ .

## Результаты исследования и их обсуждение

*Характеристика субпопуляций лимфоидных клеток в культурах исследуемых групп.* В ходе исследования проведен анализ популяций NK- и Т-клеток пациентов с синоназальными новообразованиями, групп сравнения и контроля в культурах МПК и ко-культурах МПК с опухолевой клеточной линией K562 (табл. 1).

Таблица 1

Количество цитотоксических клеток в культурах исследуемых групп пациентов

Table 1

The number of cytotoxic cells in cultures of the study groups

| Показатель                         | Тип культуры | Исследуемая группа    |                       |                       |                       | p (M-W)                                                                                                  |
|------------------------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                    |              | Пациенты с ЗНО        | Пациенты с ИП         | Группа сравнения      | Контрольная группа    |                                                                                                          |
|                                    |              | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     |                                                                                                          |
| Количество пациентов в группах (n) |              | 8                     | 7                     | 4                     | 10                    |                                                                                                          |
| НК-клетки, %                       | МПК          | 36,0<br>[28,8 ÷ 44,2] | 25,1<br>[21,3 ÷ 27,3] | 22,9<br>[11,8 ÷ 41,3] | 13,3<br>[9,9 ÷ 17,8]  | p <sub>1-4</sub> =0,001<br>p <sub>2-4</sub> =0,01                                                        |
|                                    | МПК + K562   | 31,3<br>[26,3 ÷ 38,8] | 22,4<br>[18,1 ÷ 32,5] | 19,8<br>[10,8 ÷ 31,0] | 12,5<br>[10,8 ÷ 16,5] | p <sub>1-4</sub> =0,001<br>p <sub>2-4</sub> =0,05                                                        |
| Т-клетки, %                        | МПК          | 62,3<br>[57,5 ÷ 75,1] | 67,9<br>[62,3 ÷ 75,2] | 77,0<br>[70,0 ÷ 91,0] | 74,5<br>[64,5 ÷ 78,9] | p <sub>1-3</sub> =0,008<br>p <sub>2-3</sub> =0,02                                                        |
|                                    | МПК + K562   | 67,3<br>[61,9 ÷ 72,3] | 66,1<br>[59,8 ÷ 72,8] | 78,8<br>[73,1 ÷ 81,3] | 77,5<br>[74,2 ÷ 81,8] | p <sub>1-3</sub> =0,002<br>p <sub>2-3</sub> =0,003<br>p <sub>1-4</sub> =0,001<br>p <sub>2-4</sub> =0,003 |

Пр и м е ч а н и е. МПК – мононуклеарные клетки периферической крови, ЗНО – злокачественные новообразования, ИП – инвертированная папиллома, p (M-W) – уровень статистически значимых различий, вычисленный с помощью теста Манна – Уитни.

Выявлено статистически значимое увеличение относительного количества NK-клеток пациентов со злокачественными и доброкачественными новообразованиями по сравнению с контрольной группой в культурах МПК ( $p = 0,001$  и  $p = 0,01$  соответственно) и ко-культурах с K562 ( $p = 0,001$  и  $p = 0,05$  соответственно). NK-клетки способны инфильтрировать солидные опухоли, однако в большинстве исследований сообщалось о снижении числа естественных киллеров у пациентов со злокачественными по сравнению с соответствующими доброкачественными новообразованиями. Факторами, влияющими на проникновение NK-клеток в опухоль, являются локализация новообразования, происхождение раковых клеток, а также индивидуальные особенности пациента [14]. Повышенная инфильтрация NK-клеток, основанная на экспрессии CD56 и CD57, служит фактором положительного прогноза у пациентов, страдающих различными солидными злокачественными новообразованиями, например, плоскоклеточным раком головы и шеи, легких, колоректальным раком, аденокарциномой легких [15; 16].

Установлено, что в культурах МПК относительное количество Т-клеток снижалось у пациентов со злокачественными и доброкачественными опухолями относительно группы сравнения ( $p = 0,008$  и  $p = 0,02$  соответственно), а при совместном культивировании с K562 показатель уменьшался относительно как группы сравнения ( $p = 0,002$  и  $p = 0,003$  соответственно), так и контрольной группы ( $p = 0,001$  и  $p = 0,003$  соответственно). При этом статистически значимых различий в относительном количестве Т-клеток в монокультурах МПК и ко-культурах с K562 не обнаружено для всех исследуемых групп.

Для большинства типов рака выявлена положительная связь между инфильтрирующими опухоль цитотоксическими Т-лимфоцитами и благоприятным исходом заболевания. В частности, для синоназальной плоскоклеточной карциномы продемонстрировано увеличение популяции Т-клеток у пациентов без рецидива заболевания по сравнению с пациентами с рецидивом новообразования [17; 18]. Однако в ряде

исследований показано, что высокие уровни инфильтрации эффекторных Т-клеток коррелируют с худшим прогнозом выживаемости и появлению метастаз в лимфатических узлах при злокачественных синоназальных патологиях [19; 20]. Парадоксальное сосуществование большого количества цитотоксических Т-лимфоцитов и прогрессирования новообразования может указывать на функциональное истощение киллерных клеток и существование сложных перекрестных путей взаимодействия между опухолевыми и инфильтрирующими лимфоидными клетками [21].

**Экспрессия LAMP-1/CD107a на цитотоксических лимфоидных клетках.** Для оценки функционального потенциала киллерных клеток исследована экспрессия гликопротеина лизосомальной мембраны LAMP-1/CD107a на лимфоидных клетках, который представляет собой высокогликозилированный белок массой 40 кДа, способный при активации цитотоксических клеток и высвобождении лизосомальных литических гранул оставаться на поверхности клетки, что может быть использовано в качестве маркера дегрануляции [22].

У пациентов с доброкачественными и злокачественными новообразованиями установлено снижение экспрессии CD107a на NK-клетках относительно группы сравнения в культурах МПК ( $p = 0,003$  и  $p = 0,001$  соответственно (рис. 1а), верхняя панель гистограмм), в то время как статистически значимые различия отсутствовали по сравнению с контрольной группой. В ко-культурах МПК и K562 пациентов со злокачественными и доброкачественными опухолями и здоровых лиц с клетками-мишенями показана стимуляция дегрануляции NK-клеток, сопровождающаяся статистически значимым увеличением количества CD107a-позитивных клеток ( $p = 0,007$ ,  $p = 0,007$  и  $p = 0,008$  соответственно). При этом у пациентов с новообразованиями сохранялась аналогичная культурам МПК тенденция к снижению экспрессии CD107a на NK-клетках в ко-культурах с клетками-мишенями относительно группы сравнения ( $p = 0,04$  и  $p = 0,01$  соответственно, для доброкачественных и злокачественных опухолей (рис. 1б – нижняя панель гистограмм).

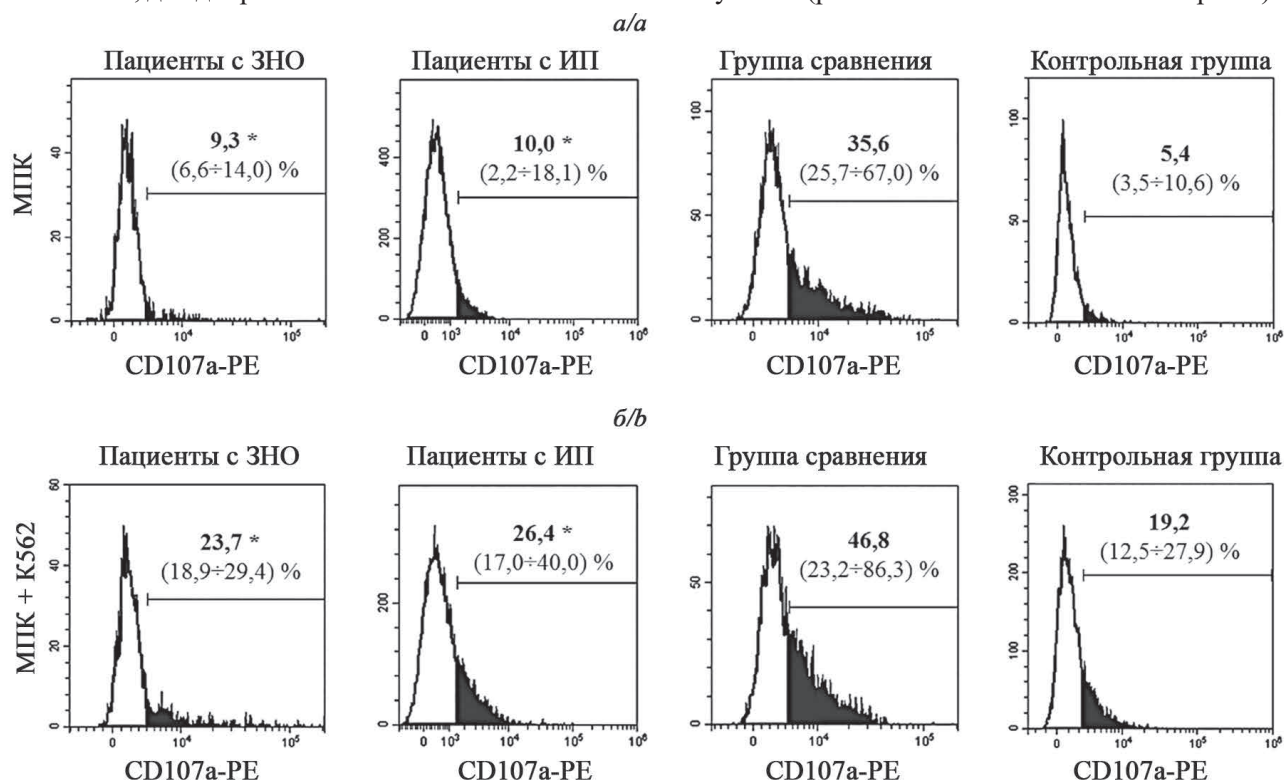


Рис. 1. Экспрессия CD107a на NK-клетках в культурах МПК (а – верхняя панель) и ко-культурах МПК с K562 (б – нижняя панель) исследуемых групп

Примечание. \* $p < 0,05$  – статистические значимые различия указаны относительно группы сравнения; МПК – мононуклеарные клетки периферической крови, ЗНО – злокачественные новообразования, ИП – инвертированная папиллома.

Fig. 1. CD107a expression on NK-cells in cultures and co-cultures of PBMCs of the study groups (a – upper panel) and co-cultures of PBMCs with K562 (b – lower panel)

Note. \* $p < 0,05$  – statistically significant differences are pointed relative to the comparison group.

Оценка экспрессии CD107a на Т-клетках исследуемых групп показала увеличение количества CD107a<sup>+</sup> Т-лимфоцитов у пациентов со злокачественными новообразованиями по сравнению с контрольной группой

при спонтанной ( $p = 0,02$ , рис. 2а – верхняя панель) и индуцированной K562 ( $p = 0,001$ , рис. 2б – нижняя панель) дегрануляции. Для пациентов с доброкачественными опухолями выявлено снижение экспрессии CD107a относительно группы сравнения в культуре МПК ( $p = 0,03$ ) и увеличение CD107a относительно контрольной группы в ко-культуре МПК и K562 ( $p = 0,001$ ). Необходимо отметить, что НК-клетки в большей степени по сравнению с Т-клетками активировались для индукции грануло-опосредованного апоптоза в клетках-мишенях, что заметно по количеству естественных киллеров, экспрессирующих маркер CD107a.

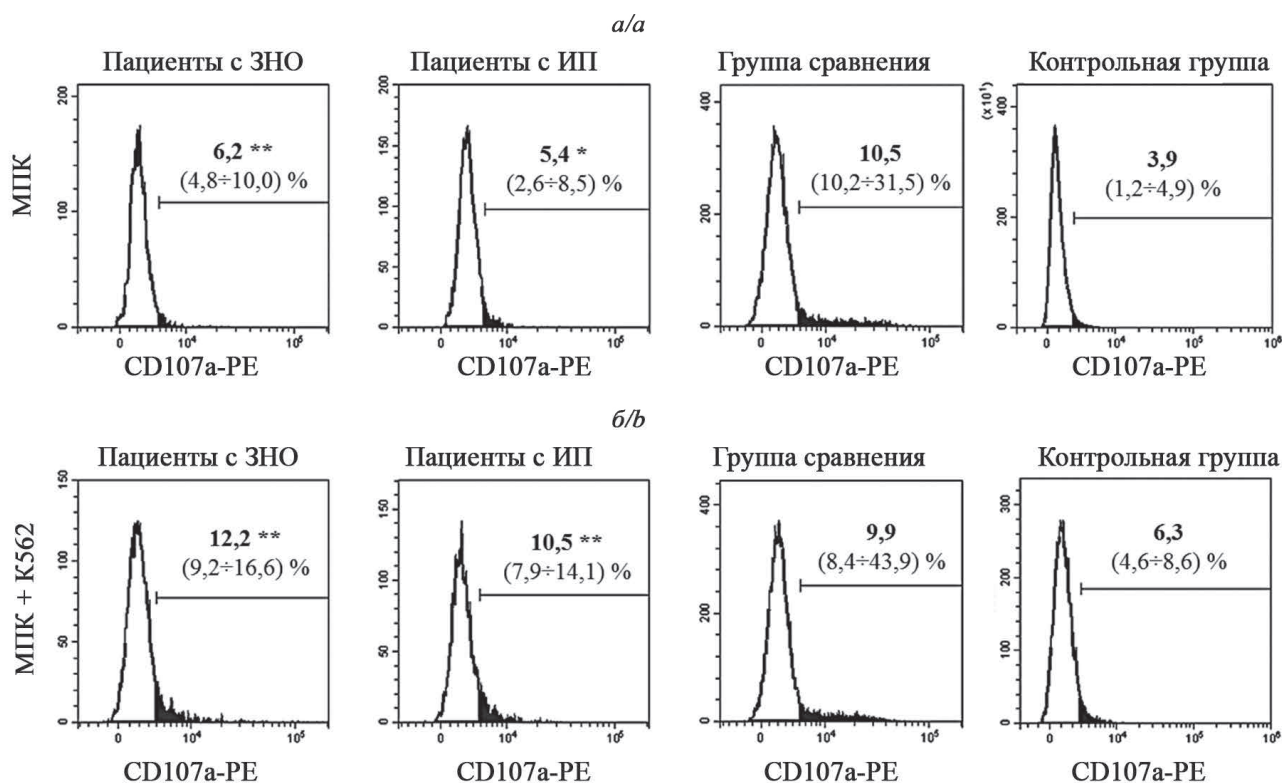


Рис. 2. Экспрессия CD107a на Т-клетках в культурах МПК (а – верхняя панель) и ко-культурах МПК с K562 (б – нижняя панель) исследуемых групп

Примечание. \* $p < 0,05$  и \*\* $p < 0,05$  – статистические значимые различия указаны относительно группы сравнения и контрольной группы, соответственно; МПК – мононуклеарные клетки периферической крови, ЗНО – злокачественные новообразования, ИП – инвертированная папиллома.

Fig. 2. CD107a expression on T-cells in cultures of PBMNCs (a – upper panel) and co-cultures of PBMNCs with K562 (b – lower panel) of the study groups

Note. \* $p < 0,05$  and \*\* $p < 0,05$  – statistically significant differences are pointed relative to the comparison group and control group, respectively.

CD107a, как и трансмембранный белок типа I, не только отвечает за поддержание структурной целостности лизосом и стабильности pH внутри лизосом, но также участвует в различных внутриклеточных физиологических процессах, таких как регуляция лизосомального цитозольного экзоцитоза и транспорта холестерина, направленного перемещения перфорины к литическим гранулам. Появляется все больше доказательств того, что CD107a участвует в иммунной дисрегуляции [29; 30]. Считается, что высокогликозилированная часть молекулы на люминальной стороне литической гранулы участвует в защите клеточной мембраны от атаки ферментов в гранулах и, таким образом, может впоследствии защищать мембрану эффекторной клетки после дегрануляции, что происходит за счет уменьшения связывания перфорины с мембраной цитотоксических клеток в иммунологическом синапсе [8]. Следовательно, LAMP-1/CD107a является не просто маркером активации и дегрануляции цитотоксических клеток, но представляет собой важный компонент в реализации эффекторных механизмов цитотоксичности.

Наряду с этим, между количеством CD107a-позитивных Т-клеток и степенью злокачественности заболевания обнаружена умеренная положительная корреляционная зависимость ( $R = 0,48$ ;  $p = 0,009$ ). Аналогичная взаимосвязь транскрипционной активности гена у пациентов с новообразованиями головного мозга установлена в исследованиях Qui и соавт. (2023) [23] и Sarafian и соавт. (2018) [24], выявивших связь высокой экспрессии CD107a с локальной прогрессией опухоли и низкой общей выживаемостью [23; 24].

Корреляция между малигнизацией новообразования и повышенной экспрессией CD107a также показана у пациентов с раком молочной железы, карциномой поджелудочной железы и колоректальным раком [25–27]. Недавние исследования выявили, что при некоторых воспалительных заболеваниях, например, аутоиммунном волчаночном нефрите, существует положительная связь между процентным содержанием CD107a+ T-клеток и индексом активности системной красной волчанки, а внутрипочечная экспрессия CD107a достоверно коррелирует с протеинурией [28]. Таким образом, появляется все больше доказательств того, что CD107a может стать будущей терапевтической мишенью для воздействия на цитотоксические клетки.

**Внутриклеточная продукция гранзима В цитотоксическими лимфоидными клетками.** Для характеристики грануло-опосредованного киллинга опухолевых клеток проведено исследование спонтанной и стимулированной внутриклеточной продукции ключевого гранзима В, инициирующего апоптоз-индуцированную клеточную гибель, в исследуемых группах пациентов. Показано снижение внутриклеточной продукции гранзима В NK-клетками (рис. 3) у пациентов с опухолями по сравнению с контрольной группой в культурах МПК ( $p = 0,05$  и  $p = 0,05$  соответственно) и совместных культурах МПК и K562 ( $p = 0,01$  и  $p = 0,03$  соответственно). При этом выявлено, что у пациентов с доброкачественными новообразованиями уровень гранзима В уменьшался более выражено, чем в группе пациентов со злокачественными опухолями ( $p = 0,05$  в культурах МПК и  $p = 0,02$  – в ко-культурах МПК и K562). При этом совместное культивирование МПК с опухолевой клеточной линией K562 у пациентов с новообразованиями не приводила к статистически значимому снижению содержания гранзима В в цитоплазме (дегрануляции) NK-клеток по сравнению с контрольной группой ( $p = 0,05$ ), что свидетельствует об истощении пула гранзим В+ NK-клеток у пациентов с синоназальными опухолями.

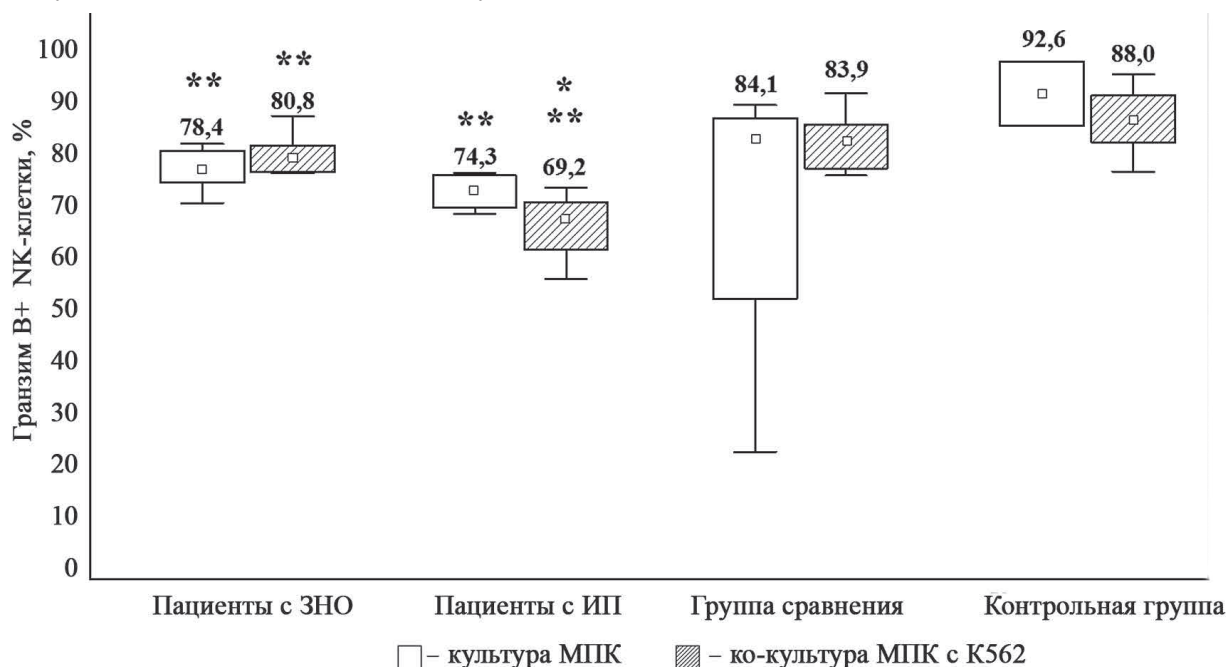


Рис. 3. Внутриклеточная продукция гранзима В NK-клетками в культурах исследуемых групп

Примечание. \* $p < 0,05$  и \*\* $p < 0,05$  – статистические значимые различия указаны относительно группы сравнения и контрольной группы соответственно; МПК – мононуклеарные клетки периферической крови, ЗНО – злокачественные новообразования, ИП – инвертированная папиллома.

Fig. 3. Granzyme B intracellular production by NK-cells in cultures of the study groups

Note. \* $p < 0,05$  and \*\* $p < 0,05$  – statistically significant differences are pointed relative to the comparison group and control group, respectively.

Оценка продукции гранзима В Т-клетками исследуемых групп (рис. 4) показала увеличение его количества у пациентов со злокачественными новообразованиями по сравнению с контрольной группой и группой сравнения при спонтанной ( $p = 0,05$  и  $p = 0,01$  соответственно) и индуцированной K562 ( $p = 0,05$  и  $p = 0,001$  соответственно) дегрануляции. Для пациентов с доброкачественными опухолями установлено увеличение уровня гранзима В относительно контрольной группы в культуре МПК ( $p = 0,05$ ) и относительно группы сравнения в ко-культуре МПК и K562 ( $p = 0,05$ ). Положительная корреляционная зависимость выявлена между степенью злокачественности заболевания и количеством продуцирующих

гранзим В Т-клеток ( $R = 0,40$ ;  $p = 0,03$ ). Отсюда следует, что у пациентов со злокачественными синоназальными новообразованиями эффекторные Т-клетки активнее вовлекаются в противоопухолевый ответ, используя механизм грануло-опосредованной цитотоксичности, позволяя использовать субпопуляции гранзим В-позитивных Т-клеток в качестве прогностических маркеров малигнизации опухолевого процесса.

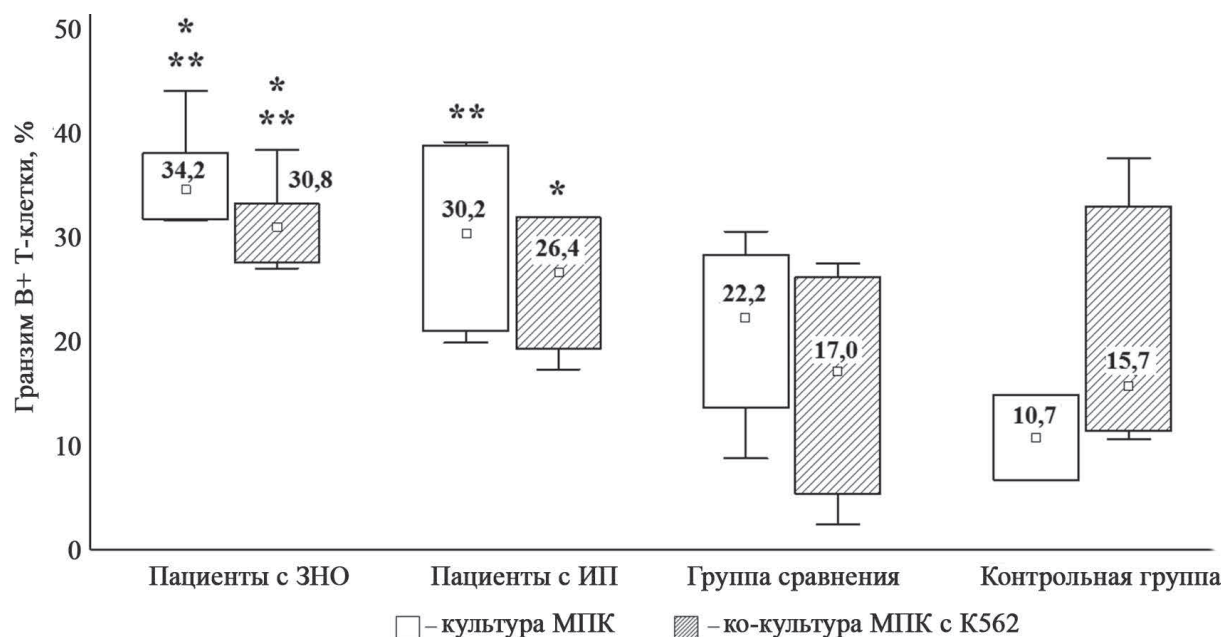


Рис. 4. Внутриклеточная продукция гранзима В Т-клетками в культурах исследуемых групп  
Примечание. \* $p < 0,05$  и \*\* $p < 0,01$  – статистически значимые различия указаны относительно группы сравнения и контрольной группы соответственно; МПК – мононуклеарные клетки периферической крови, ЗНО – злокачественные новообразования, ИП – инвертированная папиллома.

Fig. 4. Granzyme B intracellular production by T-cells in cultures of the study groups  
Note. \* $p < 0,05$  and \*\* $p < 0,01$  – statistically significant differences are pointed relative to the comparison group and control group, respectively.

Гранзимы представляют собой семейство сериновых протеаз. У человека идентифицировано 5 белков-гранзимов (А, В, Н, К и М), при этом каждый гранзим обладает уникальными протеазными характеристиками с различной субстратной специфичностью. Широкий спектр активности гранзимных протеаз индуцирует различные пути апоптоза каспазо-зависимым и независимым образом. При дегрануляции цитотоксические клетки выделяют несколько разных гранзимов, поэтому гибель клетки-мишени, вероятно, является результатом их совместного действия [2; 31]. Однако показано, что только гранзим В в сочетании с перфорином одновременно необходим и достаточен для индукции апоптоза в опухолевых клетках [1].

Хотя в механизмах продукции гранзима В существует избыточность из-за его цитотоксической природы, продукция и секреция молекулы строго регулируются как на транскрипционном, так и на трансляционном уровне [32]. Последние исследования свидетельствуют о том, что уровень экспрессии и количество клеток, продуцирующих гранзим В, связаны с прогнозом онкологических заболеваний. Например, высокая плотность гранзим В-позитивных клеток в микроокружении опухоли может иметь благоприятный эффект при плоскоклеточном раке полости рта, предотвращая распространение метастазов и улучшая прогноз выживаемости пациентов [33]. Инфильтрация цитотоксических Т-лимфоцитов и повышенная доля активированных клеток, экспрессирующих гранзим В, связаны с увеличением выживаемости среди пациентов с колоректальным раком [34]. Таким образом, количество цитотоксических клеток, экспрессирующих гранзим В, может являться полезным прогностическим маркером течения и исхода заболевания при синоназальных новообразованиях.

## Заключение

В результате проведенных исследований выявлено, что субпопуляционный состав цитотоксических клеток у пациентов с доброкачественными и злокачественными синоназальными новообразованиями характеризуется повышением количества НК-клеток и снижением количества Т-клеток по сравнению со здоровыми лицами. При этом функциональная характеристика киллерных клеток свидетельствует, что

в присутствии опухолевой клеточной линии K562 наблюдается снижение экспрессии CD107a и продукции гранзима В НК-клетками как у пациентов с доброкачественными, так и со злокачественными опухолями относительно группы сравнения и здоровых лиц, что может указывать на возможные нарушения или невосприимчивость механизмов активации цитотоксичности в НК-клетках пациентов с синоназальными новообразованиями. Наряду с этим, для пациентов со злокачественными опухолями характерно повышение количества CD107a- и гранзим В-позитивных Т-лимфоцитов в ко-культурах МПК и K562 по сравнению с контрольной группой, что коррелирует с увеличением степени малигнизации опухолевого процесса и может быть использовано в качестве прогностических маркеров прогрессии синоназальной онкопатологии. Таким образом, проведенные исследования позволили охарактеризовать эффекторные механизмы цитотоксичности лимфоидных клеток в патогенезе доброкачественных и злокачественных синоназальных новообразований, что может использоваться при разработке новых и усовершенствовании уже имеющихся подходов прогноза динамики развития опухолей полости носа и иммунотерапии.

### Библиографические ссылки / References

1. Prager I, Watzl C. Mechanisms of natural killer cell-mediated cellular cytotoxicity. *Journal of Leukocyte Biology*. 2019;105(6):1319–1329. DOI: 10.1002/JLB.MR0718-269R.
2. Ham H, Medlyn M, Billadeau DD. Locked and Loaded: Mechanisms Regulating Natural Killer Cell Lytic Granule Biogenesis and Release. *Frontiers in Immunology*. 2022;13:1–19. DOI: 10.3389/fimmu.2022.871106.
3. Baldari CT, Valitutti S, Dustin ML. Editorial: Mechanisms of lymphocyte mediated cytotoxicity in health and disease. *Frontiers in Immunology*. 2023;14:1–3. DOI: 10.3389/fimmu.2023.1226870.
4. Trapani JA. Granzymes, cytotoxic granules and cell death: the early work of Dr. Jurg Tschopp. *Cell Death and Differentiation*. 2012;19(1):21–27. DOI: 10.1038/cdd.2011.156.
5. Wang H, Huang Y, He J. Dual roles of granzyme B. *Scandinavian Journal of Immunology*. 2021;94(3):1–19. DOI: 10.1111/sji.13086.
6. Lieberman J. The ABCs of granule-mediated cytotoxicity: new weapons in the arsenal. *Nature Reviews Immunology*. 2003;3(5):361–370. DOI: 10.1038/nri1083.
7. Cohnen A, Chiang SC, Stojanovic A. Surface CD107a/LAMP-1 protects natural killer cells from degranulation-associated damage. *Blood*. 2013;122(8):1411–1418. DOI: 10.1182/blood-2012-07-441832.
8. Johnson DE, Burtneiss B, Leemans CR. Head and neck squamous cell carcinoma. *Nature Reviews Disease Primers*. 2020;6(1):1–22. DOI: 10.1038/s41572-020-00224-3.
9. Tan Y, Wang Z, Xu M. Oral squamous cell carcinomas: state of the field and emerging directions. *International Journal of Oral Science*. 2023;15(1):1–23. DOI: 10.1038/s41368-023-00249-w.
10. Lisan Q, Laccourreye O, Bonfils P. Sinonasal inverted papilloma: From diagnosis to treatment. *European Annals of Otorhinolaryngology. Head and Neck Diseases*. 2016;133(5):337–341. DOI: 10.1016/j.anorl.2016.03.006.
11. Windon MJ, D'Souza G, Rettig EM. Increasing prevalence of human papillomavirus-positive oropharyngeal cancers among older adults. *Cancer*. 2018;124(14):2993–2999. DOI: 10.1002/cncr.31385.
12. Re M, Gioacchini FM, Bajraktari A. Malignant transformation of sinonasal inverted papilloma and related genetic alterations: a systematic review. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*. 2017;274(8):2991–3000. DOI: 10.1007/s00405-017-4571-2.
13. Peltanova B, Raudenska M, Masarik M. Effect of tumor microenvironment on pathogenesis of the head and neck squamous cell carcinoma: a systematic review. *Molecular Cancer*. 2019;18(1):1–24. DOI: 10.1186/s12943-019-0983-5.
14. Guilleray C. NK Cells in the Tumor Microenvironment. *Tumor Microenvironment, Springer International Publishing*. 2020;1273:69–90. DOI: 10.1007/978-3-030-49270-0\_4.
15. Gutkin DW, Shurin MR. Clinical evaluation of systemic and local immune responses in cancer: time for integration. *Cancer Immunology, Immunotherapy*. 2014;63(1):45–57. DOI: 10.1007/s00262-013-1480-0.
16. Bisheshar SK, De Ruiter EJ, Devriese LA. The prognostic role of NK cells and their ligands in squamous cell carcinoma of the head and neck: a systematic review and meta-analysis. *Oncoimmunology*. 2020;9(1):1–10. DOI: 10.1080/2162402X.2020.1747345.
17. Rossi F, Fredericks N, Snowden A. Next Generation Natural Killer Cells for Cancer Immunotherapy. *Frontiers in Immunology*. 2022;13:1–19. DOI: 10.3389/fimmu.2022.886429.
18. Gu JT, Claudio N, Betts C. Characterization of the tumor immune microenvironment of sinonasal squamous-cell carcinoma. *International Forum of Allergy and Rhinology*. 2022;12:39–50. DOI: 10.1002/alr.22867.
19. Takahashi Y, Amit M, Gleber-Netto FO. Evaluation of the Immune Microenvironment in Sinonasal Squamous Cell Carcinoma and Its Association with Patients' Survival. *Journal of Neurological Surgery, Part B: Skull Base*. 2021;82(2):22. DOI: 10.1055/s-0041-1725265.
20. Villanueva-Fernández E, Hermsen MA, Suárez-Fernández L. Biomarkers for Immunotherapy in Poorly Differentiated Sinonasal Tumors. *Biomedicines*. 2022;10:1–16. DOI: 10.3390/biomedicines10092205.
21. García-Marín R, Reda S, Riobello C. Prognostic and Therapeutic Implications of Immune Classification by CD8+ Tumor-Infiltrating Lymphocytes and PD-L1 Expression in Sinonasal Squamous Cell Carcinoma. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22:1–11. DOI: 10.3390/ijms22136926.
22. Quan H, Yan L, Wang S. Clinical relevance and significance of programmed death-ligand 1 expression, tumor-infiltrating lymphocytes, and p16 status in sinonasal squamous cell carcinoma. *Cancer Management and Research*. 2019;11:4335–4345. DOI: 10.2147/CMAR.S201568.
23. Malkova AM. Laboratory biomarkers of an effective antitumor immune response. Clinical significance. *Cancer Treatment and Research Communications*. 2021;29:1–11. DOI: 10.1016/j.ctarc.2021.100489.
24. Qiu XF, Chen X. LAMP1/2 as potential diagnostic and prognostic marker for brain lower grade glioma: *Medicine*. 2023;102(33):1–11. DOI: 10.1097/MD.00000000000034604.

25. Sarafian VS, Koev I, Mehterov N. LAMP-1 gene is overexpressed in high grade glioma. *APMIS*. 2018;126(8):657–662. DOI: 10.1111/apm.12856.
26. Wang Q, Yao J, Jin Q. LAMP1 expression is associated with poor prognosis in breast cancer. *Oncology Letters*. 2017;14(4):4729–4735. DOI: 10.3892/ol.2017.6757.
27. Künzli BM, Berberat PO, Zhu ZW. Influences of the lysosomal associated membrane proteins (Lamp-1, Lamp-2) and Mac-2 binding protein (Mac-2-BP) on the prognosis of pancreatic carcinoma. *Cancer*. 2002;94(1):228–39. DOI: 10.1002/cncr.10162.
28. Furuta K, Ikeda M, Nakayama Y. Expression of lysosome-associated membrane proteins in human colorectal neoplasms and inflammatory diseases. *The American Journal of Pathology*. 2001;159(2):449–55. DOI: 10.1016/S0002-9440(10)61716-6.
29. Wiechmann A, Wilde B, Tyczynski B. CD107a+ (LAMP-1) Cytotoxic CD8+ T-Cells in Lupus Nephritis Patients. *Frontiers in Medicine*. 2021;8:1–9. DOI: 10.3389/fmed.2021.556776.
30. Deng S, Feng X, Yang M. LAMP1 as a novel molecular biomarker to predict the prognosis of the children with autism spectrum disorder using bioinformatics approaches. *Scientific Reports*. 2023;3(1):1–10. DOI: 10.1038/s41598-023-40617-4.
31. Krzewski K, Gil-Krzewska A, Nguyen V. LAMP1/CD107a is required for efficient perforin delivery to lytic granules and NK-cell cytotoxicity. *Blood*. 2013;121(23):4672–4683. DOI: 10.1182/blood-2012-08-453738.
32. Ewen CL, Kane KP, Bleackley RC. A quarter century of granzyme. *Cell Death and Differentiation*. 2012;9(1):28–35. DOI: 10.1038/cdd.2011.153.
33. Tibbs E, Cao X. Emerging Canonical and Non-Canonical Roles of Granzyme B in Health and Disease. *Cancers*. 2022;14(6):1–15. DOI: 10.3390/cancers14061436.
34. Taghavi N, Khaleghjou A, Mahdavi N. Correlation of P53 and granzyme B expression in oral squamous cell carcinoma with clinicopathologic findings. *Archives of Iranian Medicine*. 2013;16(9):498-502.
35. Prizment AE, Vierkant RA, Smyrk TC. Cytotoxic T Cells and Granzyme B Associated with Improved Colorectal Cancer Survival in a Prospective Cohort of Older Women. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*. 2017;26(4):622–631. DOI: 10.1158/1055-9965.EPI-16-0641.

Статья поступила в редколлегию 31.07.2024.  
Received by editorial board 31.07.2024.

---

# ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

---

## INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

---

УДК: 628.355

### СООТНОШЕНИЕ НИТЧАТОЙ И ФЛОКУЛИРУЮЩЕЙ МИКРОБИОТЫ АКТИВНОГО ИЛА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

А. А. МАСЕХНОВИЧ<sup>1)</sup>, И. А. ГРЕБЕНЧИКОВА<sup>1)</sup>, Р. М. МАРКЕВИЧ<sup>1)</sup>, М. В. РЫМОВСКАЯ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный технологический университет,  
ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь

Исследована способность нитчатых форм микроорганизмов, выделенных из биоценозов городских и производственных очистных станций, формировать нитчатые структуры и взаимодействовать с хлопками активного ила при совместном с ним культивировании в аэробных, микроаэробных и анаэробных условиях при различном соотношении объемов суспензий активный ил : нитчатые бактерии. Установлено соотношение нитчатой и флокулирующей микробиоты для эффективной биологической очистки сточных вод. Показано, что совместное культивирование активного ила и изолятов

---

#### Образец цитирования:

Масехнович АА, Гребенчикова ИА, Маркевич РМ, Рымовская МВ. Соотношение нитчатой и флокулирующей микробиоты активного ила для эффективной биологической очистки сточных вод. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;3:80–86.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-80-86>

#### For citation:

Masekhnovich AA, Grebenchikova IA, Markevich RM, Rymovskaya MV. The ratio of filamentous and flocculating microbiota of activated sludge for effective biological wastewater treatment. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;3:80–86. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-80-86>

---

#### Авторы:

**Александра Андреевна Масехнович** – аспирант кафедры биотехнологии.

**Ирина Александровна Гребенчикова** – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры биотехнологии.

**Раиса Михайловна Маркевич** – кандидат химических наук, доцент; доцент кафедры биотехнологии.

**Мария Васильевна Рымовская** – кандидат технических наук; доцент кафедры биотехнологии.

#### Authors:

**Aleksandra A. Masekhnovich**, postgraduate student at the department of biotechnology.

[al.masekhnovich@mail.ru](mailto:al.masekhnovich@mail.ru)

**Irina A. Grebenchikova**, PhD (engineering), docent; associate professor at the department of biotechnology.

[greb\\_irina\\_al@mail.ru](mailto:greb_irina_al@mail.ru)

**Raisa M. Markevich**, PhD (chemistry), docent; associate professor at the department of biotechnology.

[marami-bstu@yandex.ru](mailto:marami-bstu@yandex.ru)

**Mariya V. Rymovskaya**, PhD (engineering); associate professor at the department of biotechnology.

[rymovskaya\\_mv@mail.ru](mailto:rymovskaya_mv@mail.ru)

M7, M9 и M26 в микроаэробных условиях способствует формированию плотного и компактного хлопка активного ила, если интенсивность перемешивания достаточна для обеспечения растворенным кислородом гетеротрофной микробиоты ила, но не приводит к разрушению хлопков. При культивировании в аэробных условиях смеси активного ила с бактериями M42 отмечено формирование наиболее компактного хлопка, что может быть связано с деятельностью бактерий этого изолята, которые массово встраивались в хлопок, однако не нарушали его структуру. Бактерии изолята A33 не оказывали влияния на структуру хлопка при любых соотношениях и условиях аэрации, но обнаруживались в смешанной культуре в большом количестве. В анаэробных условиях в присутствии бактерий M26 и A12 при соотношениях активный ил : нитчатые бактерии, равных 1:1, 3:1, нарушается структура хлопка, что может приводить к снижению его седиментационной способности. Кроме того, при наличии в иловой смеси изолята A12 в культуральной жидкости наблюдается большое количество не связанных с хлопком бактериальных нитей небольшой длины, что влечет за собой значительное увеличение концентрации взвешенных веществ в отстоянной жидкости.

Установленные факты следует учитывать в процессе эксплуатации очистных сооружений при риске массового развития нитчатых бактерий изолятов M26 и A12 и не допускать формирования в биореакторах застойных зон.

**Ключевые слова:** сточные воды; активный ил; биоценоз; нитчатые формы микроорганизмов; вспухание.

**Благодарность.** Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы «Повышение эффективности процессов биологической очистки сточных вод путем стабилизации бактериального состава биоценоза активного ила» ГБ 23-042, регистрационный № 20230575.

## THE RATIO OF FILAMENTOUS AND FLOCCULATING MICROBIOTA OF ACTIVATED SLUDGE FOR EFFECTIVE BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT

A. A. MASEKHNOVICH<sup>a</sup>, I. A. GREBENCHIKOVA<sup>a</sup>, R. M. MARKEVICH<sup>a</sup>, M. V. RYMOVSKAYA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State Technological University,  
13a Sverdlova Street, Minsk 220006, Belarus

Corresponding author: A. A. Masekhnovich al.masekhnovich@mail.ru

The ability of filamentous forms of microorganisms isolated from biocenoses of urban and industrial wastewater treatment plants to form filamentous structures and interact with activated sludge flocs when co-cultivated with it at aerobic, microaerobic and anaerobic conditions and at different volume ratios of activated sludge: filamentous bacteria suspensions was studied. The ratio of filamentous and flocculating microbiota for effective biological wastewater treatment has been established. It was found that the joint cultivation of activated sludge and isolates M7, M9 and M26 in microaerobic conditions contributes to the formation of dense and compact floc of activated sludge, the mixing intensity is sufficient to provide dissolved oxygen to the heterotrophic microbiota of sludge, but does not lead to the destruction of floc. When cultivating a mixture of activated sludge and M42 bacteria under aerobic conditions, the formation of the most compact floc was noted, which may be due to the activity of bacteria of this isolate, which were massively embedded in floc, but did not violate its structure. Bacteria of isolate A33 did not affect the structure of floc at any ratios and aeration conditions, but were found in large quantities in mixed culture. Under anaerobic conditions, in the presence of M26 and A12 bacteria, at a ratios of activated sludge : filamentous bacteria equal to 1:1, 3:1, the structure of floc is disrupted, which can lead to a decrease in its sedimentation ability. In addition, in the presence of isolate A12 in the sludge mixture, a large number of non-floc bacterial filaments of small length are observed in the culture liquid, which leads to a significant increase in the concentration of suspended solids in the settled liquid.

The established facts should be taken into account when operating treatment facilities at the risk of mass development of filamentous bacteria isolates M26 and A12 and prevent the formation of dead zones in bioreactors.

**Keywords:** wastewater; activated sludge; biocenosis; filamentous forms of microorganisms; bulking.

**Acknowledgments.** The work was carried out within the framework of the research work «Improving the efficiency of biological wastewater treatment processes by stabilizing the bacterial composition of the biocenosis of activated sludge» GB 23042, No. SR 20230575.

### Введение

В настоящее время нитчатое вспухание активного ила (АИ) является наиболее распространенной в мировой практике проблемой биологической очистки сточных вод [1]. Вспухание происходит вследствие деградации видового состава активного ила. Это может произойти по многим причинам: увеличение объема сточных вод, поступающих на очистку, изменение их химического состава, концентрации отдельных загрязняющих веществ, в том числе токсичных для активного ила, колебание удельной нагрузки на ил, понижение температуры сточных вод и т. д. [2]. В результате количественное преобладание получают нитчатые бактерии как наиболее устойчивые к различным неблагоприятным факторам [3].

При вспухании размеры флоккул активного ила увеличиваются, но при этом значительно уменьшаются их плотность и, соответственно, способность к осаждению, что приводит к выносу АИ из отстойников вместе с биологически очищенными сточными водами [4]. Это также приводит к снижению эффективности биохимического окисления загрязняющих веществ и дополнительному ухудшению качества биологической очистки сточных вод. В конечном итоге вспухание ила в аэротенках вызывает проблему экологического характера – загрязнение природных водоемов [5].

В то же время наличие нитчатых бактерий в активном иле нельзя рассматривать только как отрицательное явление. При малой концентрации они вносят значимый вклад в процесс очистки сточных вод благодаря своей высокой окислительной способности, а вследствие их армирующего действия увеличиваются размеры и повышается прочность флоккул. При наличии нитчатых микроорганизмов повышается степень осветления воды при отстаивании смеси сточной воды и активного ила. Это связано с тем, что они способны улавливать и удерживать взвешенные вещества, находящиеся в воде в коллоидном и мелкодисперсном состоянии [6].

Таким образом, современные технологии биологической очистки сточных вод не предусматривают полного исключения из биоценоза активного ила нитчатых бактерий. Задача состоит в том, чтобы обеспечить оптимальное соотношение нитчатых и флокулирующих микроорганизмов [7].

Цель исследования – установление соотношения нитчатой и флокулирующей микробиоты активного ила для эффективной биологической очистки сточных вод.

### Материалы и методы исследования

В эксперименте использовали активный ил с минимальным исходным содержанием нитчатых форм микроорганизмов и суточные культуры бактериальных изолятов, выделенных из биоценозов Минской очистной станции УП «Минскводоканал» (МОС) и Слонимского картонно-бумажного завода «Альбертин», выращенных на среде ССВ, разработанной на основе среднегодового состава реальных сточных вод, поступающих на МОС.

Аэробные условия создавали путем культивирования иловой суспензии с нитчатыми микроорганизмами в емкостях с небольшим количеством питательной среды (50 см<sup>3</sup>) в шейкере-инкубаторе Environmental Shaker – Incubator ES-20 при частоте встряхиваний 160 мин<sup>-1</sup>. Для моделирования микроаэробных условий суспензию активного ила с добавлением выделенных бактерий культивировали при той же частоте встряхиваний в емкостях с высоким слоем среды, допуская лишь незначительное перемешивание культуральной жидкости. Анаэробные условия обеспечивали в плотно закрытых пробирках без перемешивания, заполняя их практически полностью (высота слоя среды около 10 см).

Для оценки влияния количества нитчатых бактерий (НБ) на структуру хлопка активного ила (АИ) были выбраны следующие соотношения количества суспензий АИ:НБ – 1:1; 3:1; 10:1.

Эксперимент проводили в течение 4 суток без внесения подпитки. Периодически отбирали пробы суспензий и микроскопировали полученные образцы при помощи микроскопа «Биологический» (увеличение ×400). Визуально оценивали численность нитчатых форм бактерий и их влияние на структуру хлопка активного ила. Для сравнения изучали изменение морфологии нитей микроорганизмов при культивировании чистых культур в идентичных условиях.

### Результаты исследования и их обсуждение

Для эксперимента были отобраны изоляты с наиболее развитой нитчатой структурой, способные сохранять ее при существенном варьировании значений внешних факторов (рис. 1).

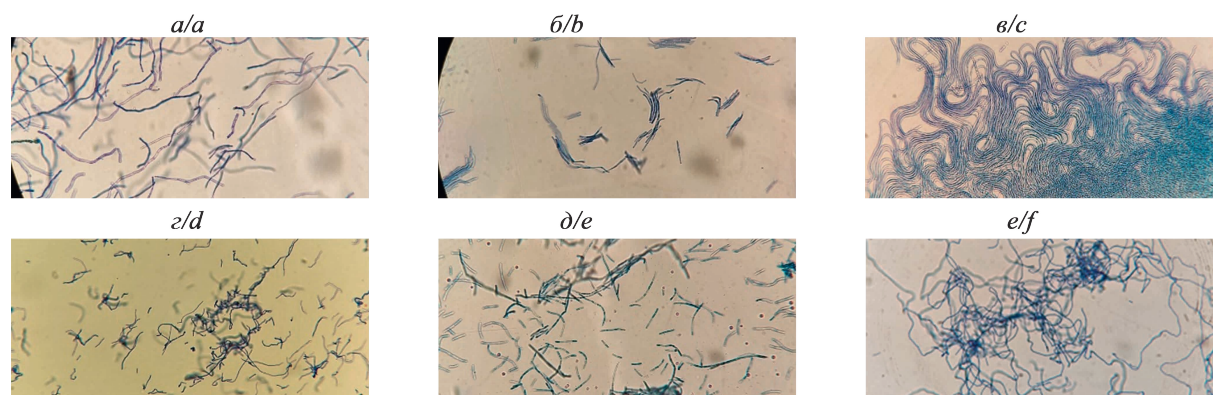


Рис. 1. Микрофотографии нитчатых форм микроорганизмов, выделенных из биоценозов активного ила Минской очистной станции УП «Минскводоканал»: а) М7, б) М9, в) М26, г) М42 и Слонимского картонно-бумажного завода «Альбертин»: д) А12, е) А33

Fig. 1. Photomicrographs of filamentous forms of microorganisms isolated from activated sludge biocenoses of the Minsk wastewater treatment plant UE «Minskvodokanal»: а) М7, б) М9, в) М26, г) М42 and Slonim cardboard and paper mill «Albertin»: е) А12, ф) А33

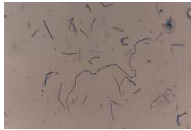
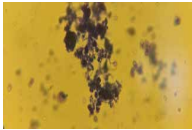
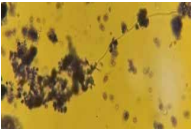
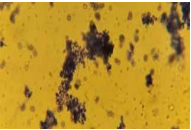
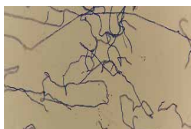
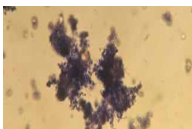
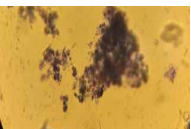
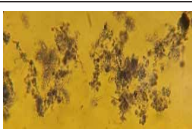
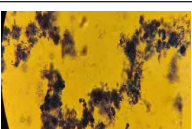
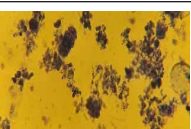
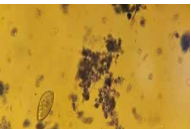
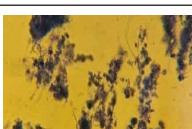
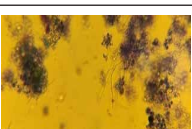
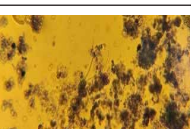
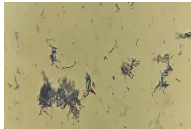
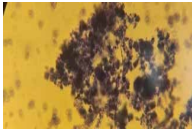
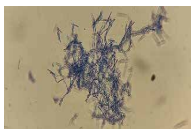
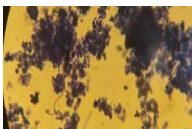
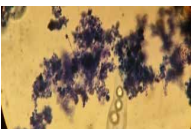
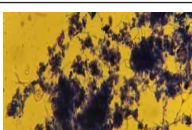
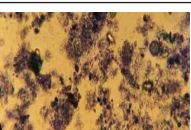
Результаты эксперимента по влиянию условий аэрации на формирование хлопка активного ила в присутствии нитчатой микробиоты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Способность нитчатых форм микроорганизмов встраиваться в структуру хлопка в различных условиях аэрации

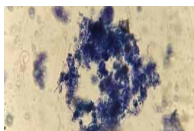
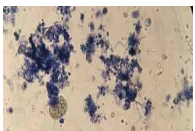
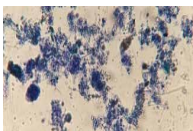
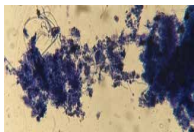
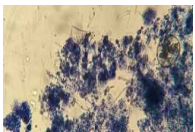
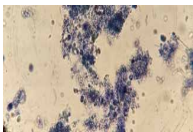
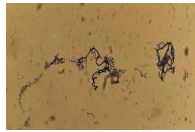
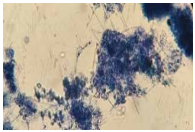
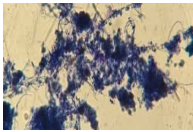
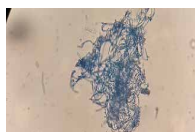
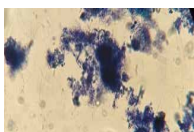
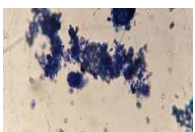
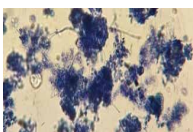
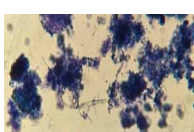
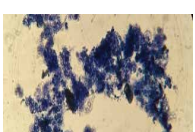
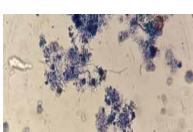
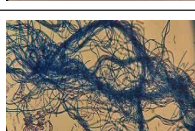
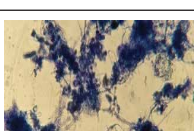
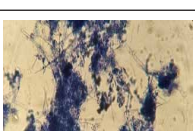
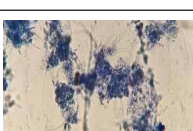
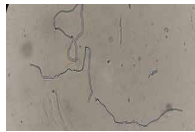
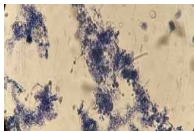
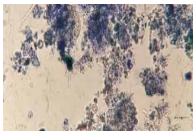
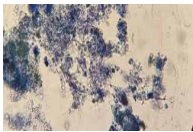
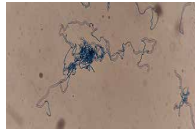
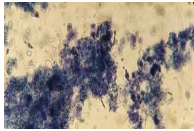
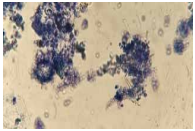
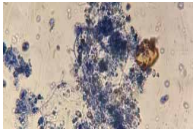
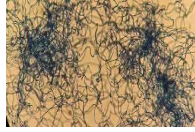
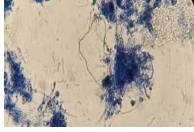
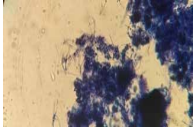
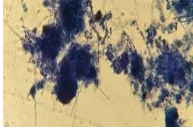
Table 1

The ability of filamentous forms of microorganisms to integrate into the structure of floc under various aeration conditions

| Условия культивирования | Микрофотографии чистых культур нитчатых бактерий                                    | Микрофотографии суспензий при соотношении активный ил : нитчатые бактерии           |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                         |                                                                                     | 1 : 1                                                                               | 3 : 1                                                                                | 10 : 1                                                                                |
| Изолят М7               |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
| Аэробные                |    |    |    |    |
| Микроаэробные           |    |    |    |    |
| Анаэробные              |   |   |   |   |
| Изолят М9               |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
| Аэробные                |  |  |  |  |
| Микроаэробные           |  |  |  |  |
| Анаэробные              |  |  |  |  |
| Изолят М26              |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
| Аэробные                |  |  |  |  |
| Микроаэробные           |  |  |  |  |
| Анаэробные              |  |  |  |  |

Окончание табл. 1

Ending table 1

| Условия культивирования | Микрофотографии чистых культур нитчатых бактерий                                    | Микрофотографии суспензий при соотношении активный ил : нитчатые бактерии           |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                         |                                                                                     | 1 : 1                                                                               | 3 : 1                                                                                | 10 : 1                                                                                |
| Изолят М42              |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
| Аэробные                |    |    |    |    |
| Микроаэробные           |    |    |    |    |
| Анаэробные              |    |    |    |    |
| Изолят А12              |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
| Аэробные                |   |   |   |   |
| Микроаэробные           |  |  |  |  |
| Анаэробные              |  |  |  |  |
| Изолят А33              |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
| Аэробные                |  |  |  |  |
| Микроаэробные           |  |  |  |  |
| Анаэробные              |  |  |  |  |

Установлено, что для всех исследуемых изолятов при соотношении количества АИ:НБ = 10:1 бактериальные нити либо визуально не обнаруживались ни в свободном состоянии, ни в структуре хлопка, либо обнаруживались в малом количестве, поэтому при обсуждении результатов эксперимента рассматривали соотношения АИ:НБ = 1:1 и 3:1.

Показано, что в чистой культуре бактерии изолята М7 образовали более выраженные нитчатые структуры в микроаэробных условиях в сравнении с аэробными и анаэробными. При культивировании совместно с активным илом нити М7 визуально фиксировались в хлопке уже после 6 ч культивирования при любых соотношениях АИ:НБ. Образование нитей было намного менее выражено в аэробных и анаэробных условиях, в этих случаях нити были короче, хуже встраивались в хлопок, часто наблюдались в свободном состоянии.

При совместном культивировании АИ и НБ М7 наиболее компактный хлопок формировался микроаэробных условиях, несмотря на большое количество длинных нитей, обнаруженных как в свободном состоянии, так и в структуре хлопка.

При культивировании бактерий М9 в чистой культуре наиболее длинные нити образовывались в анаэробных условиях. При совместном культивировании АИ и НБ М9 в соотношении 1:1 встраивание в хлопок происходило уже после 6 ч культивирования при любой интенсивности аэрации. При соотношении АИ:НБ = 3:1 после первых 6 ч культивирования в смеси наблюдались свободные нити бактерий. По прошествии 24 ч, независимо от исходного соотношения АИ:НБ и условий аэрации, наблюдалось обрастание нитей гетеротрофной микробиотой. При этом в аэробных и анаэробных условиях хлопок был более рыхлый, области с большей плотностью биомассы перемежались с менее плотными; в условиях микроаэрации формировался хлопок визуальнее компактнее, в нем было больше крупных образований.

Бактериальные нити изолята М26 наблюдались в структуре хлопка независимо от условий аэрации и соотношения АИ:НБ уже после 6 ч совместного культивирования:

- в аэробных условиях бактерии М26 образовывали нити небольшой длины в малом количестве, вследствие чего они не могли выступать как связующий элемент при формировании хлопка;
- при микроаэробных условиях бактерии М26 образовывали более длинные нити, которые успешно связывали элементы хлопка, в результате формировался крупный и более компактный хлопок активного ила;
- при совместном культивировании бактерий изолята М26 с активным илом в отсутствие аэрации отмечены разрыхление хлопка, разобщение отдельных более плотных участков и в то же время объединение их в крупные пространственные структуры за счет длинных бактериальных нитей исследуемого изолята, выступающих в роли «мостиков». Следует отметить, что при культивировании М26 в чистой культуре наибольшая длина и количество нитей наблюдались именно в анаэробных условиях.

Таким образом, внесение бактерий изолята М26 в иловую смесь в соотношении АИ:НБ = 1:1 либо 3:1 нарушало структуру хлопка активного ила в анаэробных условиях. Согласно полученным результатам, существует вероятность, что на действующих очистных сооружениях развитию данных бактерий будет способствовать наличие в биореакторах зон с отсутствием аэрации и перемешивания иловой смеси, а значительный рост их концентрации в иловой смеси может приводить к деградации хлопка ила и ухудшению его седиментационной способности.

При культивировании в чистой культуре бактерий М42 значительное количество длинных нитей наблюдалось в аэробных условиях. При совместном культивировании бактерий изолята М42 с активным илом существенное влияние оказывала интенсивность аэрации: в анаэробных и микроаэробных условиях формировалось небольшое количество нитей средней длины, обнаруженных как в свободном состоянии, так и в структуре хлопка, причем они не являлись причиной его разрыхления; в аэробных условиях отмечено формирование наиболее компактного хлопка, что может быть связано с деятельностью бактерий изолята М42, которые постепенно медленно удлинялись на протяжении всего эксперимента, при этом массово встраивались в хлопок, не нарушая его структуру.

Бактерии А12 в аэробных и микроаэробных условиях развивались медленно, оценить их участие в формировании хлопка сложно. Визуально в иловой суспензии нитей практически не наблюдалось, при этом плотная и достаточно компактная структура хлопка затрудняла выявление в нем представителей данного изолята. Данное явление отмечено для всех соотношений АИ:НБ А12.

В то же время в анаэробных условиях наблюдалось массовое развитие изолята А12, в результате чего в иловой суспензии присутствовало большое количество свободных нитей разной длины (такая же ситуация складывалась при развитии чистой культуры бактерий А12 в отсутствие аэрации). Примерно через 24 ч совместного культивирования при любых соотношениях АИ:НБ нити бактерий А12 в массовом количестве обнаружены в структуре хлопка, что привело к его деградации, снижению плотности и компактности. Этот факт следует учитывать при эксплуатации очистных сооружений и при риске массового развития нитчатых бактерий изолята А12, не допуская формирования зон с отсутствием аэрации и перемешивания иловой смеси.

В чистой культуре бактерии изолята А33 образовывали длинные нити во всех условиях аэрации, однако в анаэробных количество нитчатых структур значительно выше. При совместном культивировании АИ и НБ А33 в любых условиях аэрации не отмечено бактериальных нитей в свободном состоянии, в то же время они обнаружены в структуре хлопка уже через 6 ч от начала эксперимента.

При соотношениях АИ:НБ = 1:1, 3:1 в аэробных и микроаэробных условиях структура хлопка не была нарушена присутствием изолята А33. В анаэробных условиях количество нитей в хлопке гораздо выше,

причем их длина значительно больше, чем в аэробных и микроаэробных, однако это обстоятельство также не сказывалось на структуре хлопка, его размерах и плотности. Следовательно, при возникновении на очистных сооружениях условий, соответствующих созданным в эксперименте, бактерии изолята А33 не вызовут значительных нарушений технологического процесса.

### Заключение

Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд выводов.

1. Совместное культивирование с активным илом изолятов М7, М9 и М26 в микроаэробных условиях способствует формированию более плотного и компактного хлопка, интенсивность перемешивания достаточна для обеспечения растворенным кислородом гетеротрофной микробиоты ила, но не приводит к разрушению хлопков. Эффективность встраивания в хлопок активного ила данных нитчатых форм бактерий не зависит от исходного соотношения АИ:НБ.

2. Наличие бактерий М42 при культивировании смеси в аэробных условиях стимулировало формирование наиболее компактного хлопка, что может быть связано с деятельностью бактерий этого изолята, которые массово встраивались в хлопок, однако не нарушали его структуру.

3. Бактерий изолята А33 обнаруживались в смешанной культуре в большом количестве, но при этом не оказывали влияния на структуру хлопка при любых соотношениях и условиях аэрации.

4. Важное практическое значение имеют следующие результаты: наличие в смеси бактерий М26 и А12 при соотношении АИ:НБ = 1:1, 3:1 в анаэробных условиях приводит к нарушению структуры хлопка (в нем наблюдаются небольшие более плотные разрозненные участки, связанные длинными «мостиками» нитчатых бактерий), что может приводить к снижению его седиментационной способности. Кроме того, в случае присутствия в иловой смеси изолята А12 в отсутствие аэрации в культуральной жидкости наблюдается большое количество не связанных с хлопком бактериальных нитей небольшой длины, а это влечет за собой значительное увеличение концентрации взвешенных веществ в отстоянной жидкости. Установленные факты следует учитывать в процессе эксплуатации очистных сооружений при риске массового развития нитчатых бактерий изолятов М42 и А12 и не допускать формирования в биореакторах застойных зон с отсутствием аэрации и перемешивания иловой смеси.

### Библиографические ссылки

1. Ручай НС, Маркевич РМ. *Экологическая биотехнология*. Минск: БГТУ; 2006. 312 с.
2. Гогина ЕС, Гульшин ИА. Использование озона для контроля нитчатого вспухания активного ила. *Строительство: наука и образование*. 2012;3:6–28.
3. Маркевич РМ, Гребенчикова ИА, Рымовская МВ. *Биотехнологическая переработка промышленных отходов*. Минск: БГТУ; 2018. 300 с.
4. Seviour RJ, Blackall LL. *The microbiology of activated sludge*. Dordrecht: Springer; 1999. 422 p.
5. Усачева КВ, Верес ЮК. Устранение нитчатого вспухания активного ила в условиях эксперимента. В: *Сборник научных работ студентов Республики Беларусь «НИРС 2011»*. Минск: БГУ; 2012. с. 65–69.
6. Кичигина СВ. Устойчивость функционирования систем биологической очистки путем исключения нитчатого вспухания активного ила [автореферат диссертации]. Щелково: [б. и.]; 2007. 28 с.
7. Жмур НС. *Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками*. Москва: АКВАРОС; 2003. 512 с.

### References

1. Ruchay NS, Markevich RM. *Ekologicheskaya biotekhnologiya* [Environmental biotechnology]. Minsk: BGTU; 2006. 312 p. Russian.
2. Gogina ES, Gulshin IA. *Ispol'zovanie ozona dlya kontrolya nitchatogo vspukhaniya aktivnogo ila* [The use of ozone to control filamentous swelling of activated sludge]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie*. 2012;3:6–28. Russian.
3. Markevich RM, Grebenchikova IA, Rymovskaya MV. *Biotekhnologicheskaya pererabotka promyshlennykh otkhodov* [Biotechnological processing of industrial waste]. Minsk: BGTU; 2018. 300 p. Russian.
4. Seviour RJ, Blackall LL. *The microbiology of activated sludge*. Dordrecht: Springer; 1999. 422 p.
5. Usacheva KV, Veres YuK. *Ustranenie nitchatogo vspukhaniya aktivnogo ila v usloviyakh eksperimenta*. V: *Sbornik nauchnykh rabot studentov Respubliki Belarus «NIRS 2011»* [Elimination of filamentous swelling of activated sludge under experimental conditions]. . Minsk: BGU; 2012. p. 65–69. Russian.
6. Kichigina SV. *Ustoychivost funktsionirovaniya sistem biologicheskoy ochistki putem isklyucheniya nitchatogo vspukhaniya aktivnogo ila. Avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Stability of the functioning of biological purification systems by eliminating filamentous swelling of activated sludge [PhD thesis]. Shchelkovo: [publisher unknown]; 2007. 28 p. Russian.
7. Zhmur NS. *Tekhnologicheskie i biokhimicheskie protsessy ochistki stochnykh vod na sooruzheniyakh s aerotenkami* [Technological and biochemical processes of wastewater treatment at facilities with aerotanks]. Moscow: AKVAROS; 2003. 512 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 24.07.2024.  
Received by editorial board 24.07.2024.

## РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧ ПРОТОКОЛА ПО ПРОБЛЕМАМ ВОДЫ И ЗДОРОВЬЯ СОГЛАСНО МЕЖДУНАРОДНЫМ ОБЯЗАТЕЛЬСТВАМ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Ю. В. ГОЛОД<sup>1)</sup>, С. А. ДУБЕНОК<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов,  
ул. Славинского, 2а, корпус 1, 220086, Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Беларусь

Республика Беларусь с 2003 г. является стороной Конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер 1992 г., а с 2009 г. страна присоединилась к Протоколу по проблемам воды и здоровья, принятому в 1999 г., к указанной Конвенции. Основной целью Протокола по проблемам воды и здоровья является охрана здоровья и благополучия человека путем совершенствования управления водохозяйственной деятельностью, включая охрану водных экосистем и сокращение заболеваний, связанных с водой.

Протокол по проблемам воды и здоровья включает 20 целевых областей, по которым страны устанавливают национальные целевые показатели, которые необходимо достигать или поддерживать. Поскольку Протокол по проблемам воды и здоровья непосредственно ориентирован на охрану здоровья и благополучия человека в рамках устойчивого развития, то он тесно увязан с целями устойчивого развития (ЦУР), принятыми ООН в 2015 г., а именно с ЦУР 3 и ЦУР 6. Для его реализации в Республике Беларусь в 2021 г. утвержден Комплекс мер по выполнению обязательств, принятых Республикой Беларусь по Протоколу по проблемам воды и здоровья, до 2030 г.

В исследовании проведена оценка текущего прогресса реализации четырех задач Комплекса мер, затрагивающих вопросы сброса сточных вод в окружающую среду, в синергизме с реализацией задач ЦУР 6.

Задачи ЦУР 6 охватывают две целевые области Протокола по проблемам воды и здоровья: область X Протокола – «Частотность сбросов необработанных потоков ливневых вод из коллекторных систем для сточных вод» (1 задача и 2 целевых показателя) и область XI Протокола – «Качество сбросов сточных вод из установок по очистке сточных вод» (3 задачи и 3 целевых показателя).

**Ключевые слова:** водные ресурсы; водопользование; сточные воды; государственный водный кадастр; цели устойчивого развития.

### Образец цитирования:

Голод ЮВ, Дубенок СА. Реализация задач Протокола по проблемам воды и здоровья согласно международным обязательствам Республики Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;3:87–99.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-87-99>

### For citation:

Holad YuV, Dubianok SA. Implementation of the Protocol objectives on the issues of water and health according to international obligations of the Republic of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;3:87–99. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-87-99>

### Авторы:

Юлия Васильевна Голод – старший научный сотрудник.  
Снежана Анатольевна Дубенок – кандидат технических наук; доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение».

### Authors:

Yuliya V. Holad, senior researcher.  
[yliia-gold@mail.ru](mailto:yliia-gold@mail.ru)  
Sniazhana A. Dubianok, PhD (engineering); associate professor at the department «Water supply and sanitation».  
[dsnega@list.ru](mailto:dsnega@list.ru)

## IMPLEMENTATION OF THE PROTOCOL OBJECTIVES ON THE ISSUES OF WATER AND HEALTH ACCORDING TO INTERNATIONAL OBLIGATIONS OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Yu. V. HOLAD<sup>a</sup>, S. A. DUBIANOK<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Central Research Institute for Complex Use of Water Resources,  
2a Slavinskogo Street, building 1, Minsk 220086, Belarus

<sup>b</sup>Belarusian National Technical University,  
65 Niezaležnasci Avenue, Minsk 220013, Belarus  
Corresponding author: S. A. Dubianok (dsnega@list.ru)

Since 2003, the Republic of Belarus has been a party to the 1992 Convention on the Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes, and since 2009 the country has acceded to the Protocol on Water and Health, adopted in 1999 to the said Convention. The main objective of the Protocol on Water and Health is to protect human health and well-being by improving water management, including the protection of aquatic ecosystems and the reduction of water-related diseases. The Protocol on Water and Health includes 20 target areas for which countries set national targets to be achieved or maintained. The Protocol on Water and Health is directly focused on protecting human health and well-being within the framework of sustainable development, and is therefore linked to the Sustainable Development Goals (SDGs) adopted by the UN in 2015, namely SDG 3 and SDG 6. In 2021, in order to implement the Protocol on Water and Health, the Republic of Belarus approved the Set of Measures to meet the obligations undertaken by the Republic of Belarus under the Protocol on Water and Health to the 1992 Convention on the Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes until 2030.

The article assesses the current progress in the implementation of the four objectives of the Set of Measures addressing issues of wastewater discharge into the environment, in synergy with the implementation of SDG 6 objectives. SDG 6 targets cover two target areas of the Protocol on Water and Health: Protocol Area X – «Frequency of discharges of untreated storm water flows from wastewater sewer systems» (1 task and 2 targets) and Protocol Area XI – «Quality of wastewater discharges from wastewater treatment plants» (3 tasks and 3 targets).

**Keywords:** water resources; water use; wastewater; state water cadaster; sustainable development goals.

### Введение

Республика Беларусь является стороной ряда международных конвенций, в том числе Конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер 1992 г. (далее – Конвенция по трансграничным водам), к которой страна присоединилась Указом Президента Республики Беларусь от 21 апреля 2003 г. № 161 «О присоединении Республики Беларусь к Конвенции по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер» (вступила в силу для Республики Беларусь 27 августа 2003 г.). Документ по трансграничным водам является мощным глобальным инструментом для развития регионального и глобального трансграничного водного сотрудничества между странами.

В 1999 г. к Конвенции по трансграничным водам принят Протокол по проблемам воды и здоровья<sup>1</sup>, к которому страна присоединилась Указом Президента Республики Беларусь от 31.03.2009 № 159.

Основной целью Протокола по проблемам воды и здоровья является содействие на всех уровнях (на национальном, а также в трансграничном и международном контексте) охране здоровья и благополучия человека в рамках устойчивого развития путем совершенствования управления водохозяйственной деятельностью, включая охрану водных экосистем и сокращение степени распространения заболеваний связанных с водой.

Протокол по проблемам воды и здоровья включает 20 целевых областей, по которым страны, являющиеся Сторонами Протокола, должны принимать все соответствующие меры, направленные на повышение эффективности обеспечения населения питьевой водой хорошего качества, включая эффективную охрану водных ресурсов, используемых в качестве источников питьевой воды и объектов рекреации, от загрязнения, очистку воды, создание и обслуживание систем водоснабжения и водоотведения. Также необходимо принятие определенных мер по охране здоровья человека от заболеваний, связанных с водой.

Поскольку Протокол по проблемам воды и здоровья непосредственно ориентирован на охрану здоровья и благополучия человека в рамках устойчивого развития, очевидна его связь с целями устойчивого развития (далее – ЦУР), принятыми ООН в 2015 г. в документе «Преобразование нашего мира: повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года»<sup>2</sup> (далее – Повестки дня на период до 2030 года).

<sup>1</sup> Конвенция по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер [Электронный ресурс]. URL: [https://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/conventions/watercourses\\_lakes.shtml](https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/watercourses_lakes.shtml) (дата обращения: 01.03.2024).

<sup>2</sup> Повестка дня в области устойчивого развития до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/> (дата обращения: 01.03.2024).

Из 17 целей устойчивого развития, большая часть в той или иной степени связана с Протоколом по проблемам воды и здоровья – ЦУР 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 15, 16 и 17.

Наиболее тесная взаимосвязь прослеживается с ЦУР 3 «Обеспечение здорового образа жизни и содействие благополучию для всех в любом возрасте» и ЦУР 6 «Обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов и санитарии для всех». Полностью согласуются между собой не только цели Протокола и Повестки дня на период до 2030 г., но и области работы Протокола тесно связаны с задачами, предусмотренными ЦУР 3 и ЦУР 6.

Установление согласованного набора целей и показателей, их выполнение обеспечивает логическую связность политики, достижение синергического эффекта в реализации задач и стимулирует интеграцию сбора и анализов данных.

Реализация положений Протокола по проблемам воды и здоровья на национальном уровне осуществляется путем установления и публикации национальных целевых показателей в отношении норм и уровней результативности, которые необходимо достигать или поддерживать для обеспечения высокого качества защиты от заболеваний, связанных с водой (основные проблемные области перечислены в п. 2 статьи 6 Протокола). Каждая страна самостоятельно определяет области, в которых ей необходимо установить целевые показатели [1].

В целях содействия достижению целевых показателей страна разрабатывает на трансграничном, национальном и/или местном уровне планы управления водохозяйственной деятельностью, которые могут быть составной частью других соответствующих планов, программ или стратегических документов.

В соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 31.03.2009 № 159 Министерство здравоохранения (Минздрав) и Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды (Минприроды) определены органами, ответственными за выполнение обязательств, принятых Республикой Беларусь по Протоколу по проблемам воды и здоровья.

Для реализации Протокола по проблемам воды и здоровья Минздравом совместно с Минприроды и Министерством жилищно-коммунального хозяйства на основании проведенного анализа ситуации в отрасли водоснабжения и водоотведения, оценки состояния водных ресурсов в 2021 г. утвержден Комплекс мер по реализации обязательств, принятых Республикой Беларусь по Протоколу по проблемам воды и здоровья, до 2030 г. (далее – Комплекс мер по ПВЗ)<sup>3</sup>.

В Республике Беларусь Комплекс мер по ПВЗ тесно увязан с показателями ЦУР 3 и ЦУР 6.

Комплекс мер по ПВЗ включает задачи, перечень целевых показателей со сроками их достижения, мероприятия по достижению целевых показателей и исполнителей этих мероприятий.

В составе Комплекса мер по ПВЗ обоснованы 17 актуальных для Республики Беларусь целевых областей, в которых определены 29 задач и 43 целевых показателя для оценки их достижения.

Реализация Комплекса мер по ПВЗ Республикой Беларусь ведется с 2021 г. Ответственными исполнителями мероприятий определены республиканские органы государственного управления, иные организации, подчиненные Правительству по компетенции, исполнительные и распорядительные органы, организации, осуществляющие эксплуатацию систем водоотведения, и другие заинтересованные.

Цель исследования – оценить текущий прогресс реализации задач Комплекса мер по ПВЗ, затрагивающих вопросы сброса сточных вод в окружающую среду, в синергизме с реализацией задач ЦУР 6.

## Материалы и методы исследования

Оценка текущего прогресса выполнения каждой целевой области Протокола формируется на основе анализа выполнения мероприятий, запланированных для решения каждой задачи, а достижение целевых показателей по каждой задаче указывает на обоснованность и эффективность мероприятий, предусмотренных для ее выполнения.

Практические вопросы реализации задач Комплекса мер по ПВЗ, связанных со сбросом сточных вод в окружающую среду, напрямую охватывают две целевые области ПВЗ:

- область X Протокола – «Частотность сбросов необработанных потоков ливневых вод из коллекторных систем для сточных вод» (1 задача и 2 целевых показателя);
- область XI Протокола – «Качество сбросов сточных вод из установок по очистке сточных вод» (3 задачи и 3 целевых показателя).

При этом реализация поставленных в составе этих двух целевых областей задач тесно пресекается с задачей 6.3 «К 2030 году повысить качество воды посредством уменьшения загрязнения, ликвидации сброса отходов и сведения к минимуму выбросов опасных химических веществ и материалов, сокращения вдвое

<sup>3</sup>Комплекс мер по реализации обязательств, принятых Республикой Беларусь по Протоколу по проблемам воды и здоровья, до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://rspch.by/Docs/complex%20measures\\_17-03-2021\\_rus.pdf](http://chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://rspch.by/Docs/complex%20measures_17-03-2021_rus.pdf) (дата обращения: 01.03.2024).

доли неочищенных сточных вод и значительного увеличения масштабов рециркуляции и безопасного повторного использования сточных вод во всем мире», решаемой на национальном уровне в рамках ЦУР 6.

В рамках задачи 6.3 на международном и национальном уровнях определены два показателя, позволяющие отслеживать прогресс реализации задачи:

– 6.3.1 «Доля безопасно очищаемых хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод»;

– 6.3.2.1 «Доля поверхностных водных объектов, которым присвоен «хороший» и выше экологический (гидробиологический) статус».

При этом на национальном уровне определены и закреплены в Национальной стратегии управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 г. целевые значения показателей 6.3.1 и 6.3.2 и сроки их достижения:

– индекс сброса недостаточно очищенных сточных вод в водные объекты (к уровню 2015 г.) – не менее 30 % к 2025 г., 0 % к 2030 г.;

– доля поверхностных водных объектов, которым присвоен хороший и выше экологический статус, – не менее 75 % к 2025 г., 85 % к 2030 г.<sup>4</sup>

Синергизм целевых показателей Комплекса мер по ПВЗ с показателями задачи 6.3 ЦУР 6 представлен в табл. 1.

Суммарно для решения четырех задач запланирована реализация 17 различных мероприятий институционального, научно-практического и технического характера.

В исследовании проведен анализ выполнения запланированных мероприятий и оценен прогресс в достижении показателей.

Таблица 1

Синергизм целевых показателей Комплекса мер по ПВЗ с показателями задачи 6.3 ЦУР 6

Table 1

Synergy of target indicators of the Package of Measures for the Water and Health Protocol with indicators of target 6.3 of SDG 6

| Наименование целевого показателя (сроки достижения целевого показателя)                                                                                               | Мероприятия по достижению целевого показателя (сроки выполнения)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Исполнитель мероприятия по достижению целевого показателя                                                                          | Соответствующий показатель ЦУР 6 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| <b>9. Частотность сбросов необработанных потоков ливневых вод из коллекторных систем для сточных вод (подпункт i пункта g части 2 статьи 6) – область X Протокола</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                    |                                  |
| Задача 9.1. Совершенствование системы управления дождевой канализацией                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                    |                                  |
| 9.1.1. Повышение учета количества (объема сброса) и контроля качества поверхностных сточных вод, сбрасываемых в поверхностные водные объекты (2025 г.)                | Мероприятие 1. Инвентаризация выпусков сточных вод в поверхностные водные объекты, координатная привязка выпусков сточных вод в водные объекты в населенных пунктах с численностью населения 50 тыс. чел. и более.<br>Мероприятие 2. Получение разрешений на специальное водопользование предприятиями, осуществляющими сброс поверхностных сточных вод в поверхностные водные объекты | Минприроды (1)<br>Предприятия, на балансе которых находятся системы дождевой канализации (2)                                       | 6.3.1                            |
| 9.1.2. Инвентаризация сетей дождевой канализации в населенных пунктах с численностью населения 100 тыс. чел. и более (2025 г.)                                        | Мероприятие 1. Инвентаризация сетей дождевой канализации в 15 городах с целью определения необходимости строительства очистных сооружений дождевой канализации на сбросе поверхностных сточных вод в поверхностные водные объекты                                                                                                                                                      | Местные исполнительные и распорядительные органы (1)<br>Предприятия, на балансе которых находятся системы дождевой канализации (1) | 6.3.1                            |

<sup>4</sup>О Национальной стратегии управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года [Электронный ресурс]: Постановление Совета Министров Республики Беларусь, 22 февр. 2022 г., № 91. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22200091> (дата обращения: 01.03.2024).

Продолжение табл. 1

Continue table 1

| Наименование целевого показателя (сроки достижения целевого показателя)                                                                                                                                                         | Мероприятия по достижению целевого показателя (сроки выполнения)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Исполнитель мероприятия по достижению целевого показателя                                                                                                                                                                                                                         | Соответствующий показатель ЦУР 6 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| <b>10. Качество сбросов сточных вод из установок по очистке сточных вод (пункт h части 2 статьи 6) – область XI Протокола</b>                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                  |
| Задача 10.1. Сокращение массы сброса тяжелых металлов в составе сточных вод в поверхностные водные объекты после очистных сооружений                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                  |
| 10.1.1. Снижение поступления тяжелых металлов (медь, свинец, железо общее, хром общий, никель, цинк) в составе сточных вод поверхностные водные объекты (в % к уровню 2015 г.):<br>– на 20 % до 2025 г.<br>– на 25 % до 2030 г. | Мероприятие 1. Создание механизмов экономического стимулирования сокращения сброса загрязняющих веществ в составе производственных сточных вод предприятий в сети коммунальной канализации, включая проработку вопроса об установлении ставок экологического налога за сброс сточных вод в зависимости от массы сброса загрязняющих веществ в сточных водах.<br>Мероприятие 2. Разработка НПА об установлении единых требований по приему, транспортировке и очистке производственных сточных вод при их сбросе в сети коммунальной канализации для снижения нагрузки на коммунальные очистные сооружения.<br>Мероприятие 3. Мероприятия по взаимосвязанной области VIII Протокола                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Минэкономики (1)<br>Министерство по налогам и сборам (1)<br>Министерство финансов (1)<br>Минжилкомхоз (1, 2)<br>Минприроды (3)<br>Местные исполнительные и распорядительные органы (3)<br>Организации ВКХ (3)                                                                     | 6.3.1                            |
| Задача 10.2. Сокращение объемов сброса недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водные объекты                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                  |
| 10.2.1. Индекс сброса недостаточно очищенных сточных вод, отводимых в поверхностные водные объекты после очистных сооружений (в % к уровню 2015 г.):<br>– 30 % до 2025 г.<br>– 30 % до 2030 г.                                  | Мероприятие 1. Разработка НПА об установлении единых требований по приему, транспортировке и очистке производственных сточных вод при их сбросе в сети коммунальной канализации для снижения нагрузки на коммунальные очистные сооружения.<br>Мероприятие 2. Организация приборного учета сточных вод, сбрасываемых в централизованные коммунальные системы водоотведения населенных пунктов (2025 г.).<br>Мероприятие 3. Строительство, реконструкция и модернизация локальных очистных сооружений абонентами – промышленными предприятиями, оказывающими наибольшую нагрузку на коммунальные очистные сооружения (2030 г.).<br>Мероприятие 4. Строительство, реконструкция и модернизация очистных сооружений полной биологической очистки сточных вод централизованных коммунальных систем водоотведения (не менее 5), в том числе с привлечением средств международных финансовых организаций (2030 г.).<br>Мероприятие 5. Разработка и реализация Плана действий по сокращению объемов сброса недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водные объекты.<br>Мероприятие 6. Разработка ТНПА, содержащего экологические требования к размещению и эксплуатации свиноводческих комплексов и иных объектов животноводства.<br>Мероприятие 7. Мероприятия по взаимосвязанной области VIII Протокола | Минжилкомхоз (1)<br>Предприятия и организации (2, 3)<br>Отраслевые органы государственного управления и иные государственные организации, подчиненные Правительству (2, 3)<br>Местные исполнительные и распорядительные органы (4, 7)<br>Минприроды (5, 6)<br>Организации ВКХ (7) | 6.3.1                            |

Окончание табл. 1

Ending table 1

| Наименование целевого показателя (сроки достижения целевого показателя)                                                                                        | Мероприятия по достижению целевого показателя (сроки выполнения)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Исполнитель мероприятия по достижению целевого показателя                | Соответствующий показатель ЦУР 6 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Задача 10.3. Увеличение доли поверхностных водных объектов, которым присвоен «хороший» и выше экологический статус                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                          |                                  |
| 10.3.1. Доля поверхностных водных объектов, которым присвоен «хороший» и выше экологический статус, %:<br>не менее 75 % до 2025 г.<br>не менее 80 % до 2030 г. | Мероприятие 1. Разработка требований к классификации поверхностных водных объектов для определения основ отнесения поверхностных водных объектов к сильноизмененным.<br>Мероприятие 2. Проведение мониторинга поверхностных вод, локального мониторинга в составе НСМОС.<br>Мероприятие 3. Развертывание сети гидроморфологического мониторинга.<br>Мероприятие 4. Разработка и корректировка проектов водоохранных зон и прибрежных полос | Минприроды (1–3)<br>Местные исполнительные и распорядительные органы (4) | 6.3.2.1                          |

Результаты исследования и их обсуждение

Для первой целевой области X в Комплексе мер по ПВЗ разработан комплекс мероприятий, направленных на решение задачи 1 «Совершенствование системы управления дождевой канализацией» раздела 9 «Частотность сбросов необработанных потоков ливневых вод из коллекторных систем для сточных вод».

Разработанные мероприятия по целевому показателю 9.1.1 содействуют инвентаризации выпусков сточных вод в поверхностные водные объекты и сетей дождевой канализации, что позволит повысить качество учета и контроль за качественными и количественными характеристиками сточных вод, сбрасываемых в поверхностные водные объекты. Выявление новых выпусков поверхностных сточных вод приводит к получению водопользователем новых разрешений на специальное водопользование или комплексных природоохранных разрешений. Согласно Плану действий по сокращению сброса сточных вод в поверхностные водные объекты с превышением нормативов допустимого сброса химических и иных веществ на период 2023–2025 гг., актуализация сведений реестра выпусков сточных вод в поверхностные водные объекты Республики Беларусь осуществляется РУП «ЦНИИКИВР» ежегодно, не позднее 30 ноября.

В Беларуси наблюдается положительная динамика выполнения мероприятия 1 целевого показателя 9.1.2 за счет регулярной работы по инвентаризации сетей дождевой канализации организациями, являющимися балансодержателями сетей дождевой канализации. Так, протяженность сетей дождевой канализации, находящихся в коммунальной собственности в 2023 г., по сравнению с 2022 г., увеличилась в большинстве крупных городов страны. В табл. 2 приведены данные по протяженности сетей дождевой канализации, находящихся в коммунальной собственности, в крупных городах страны за 2022 и 2023 гг.

Учитывая, что допустимо вести учет количественных характеристик поверхностных сточных вод неинструментальным методом, основываясь на площади стока, то при реализации мероприятия 1 за счет увеличения трассировки сетей дождевой канализации и площади стока, охватываемой данными сетями, наблюдается увеличение объемов сброса поверхностных сточных вод в водные объекты и, как следствие, увеличение массы сбрасываемых загрязняющих веществ.

В табл. 3 приведены данные по объемам сбрасываемых поверхностных сточных вод в поверхностные водные объекты за период 2018–2023 гг., указывающие на устойчивую динамику по увеличению объемов сброса.

Таблица 2

Протяженность сетей дождевой канализации, находящихся в коммунальной собственности за 2022 г. и 2023 г.

Table 2

The length of rainwater drainage networks in communal ownership in 2022 and 2023

| Населенный пункт | Балансодержатель сетей дождевой канализации                                                                                     | Протяженность (км) |         |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|
|                  |                                                                                                                                 | 2022 г.            | 2023 г. |
| Минск            | ГПО «Горремавтодор Мингорисполкома»                                                                                             | 2062,90            | 2086,42 |
| Гродно           | КУП «Ремстройавтодор»                                                                                                           | 595,84             | 607,08  |
| Брест            | КУП «Брестское дорожно-эксплуатационное предприятие»                                                                            | 350,50             | 350,50  |
| Гомель           | Коммунальное автомобильное унитарное предприятие по содержанию дорог «ГорСАП»                                                   | 345,80             | 352,00  |
| Могилев          | МГКУ дорожно-мостовое предприятие, завод «Могилёвтрансмаш»<br>ОАО «МАЗ» – управляющая компания холдинга «Белавтомаз» г. Могилев | 308,70             | 314,95  |
| Бобруйск         | КУП «ДЭП г. Бобруйска»                                                                                                          | 181,571            | 184,012 |
| Витебск          | Государственное предприятие «Гордормост»                                                                                        | 163,405            | 163,405 |
| Пинск            | КПУП «ЖРЭУ г. Пинска»                                                                                                           | 145,00             | 145,00  |
| Лида             | Лидское ГУП ЖКХ                                                                                                                 | 107,00             | 125,00  |

Таблица 3

Объем сбрасываемых поверхностных сточных вод за период 2018–2023 гг.

Table 3

The volume of discharged surface wastewater for the period 2018–2023

| Наименование                                                            | 2018      | 2019      | 2020       | 2021       | 2022       | 2023       |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Объем сбрасываемых<br>поверхностных сточных вод,<br>тыс. м <sup>3</sup> | 82191,335 | 71225,365 | 101947,646 | 118453,554 | 120074,294 | 137161,381 |

Также следует отметить, что контроль качественных характеристик поверхностных сточных вод, сбрасываемых в водные объекты, может осуществляться с периодичностью не чаще чем 1 раз в полгода, что сказывается на неточности расчета массы загрязняющих веществ в связи с небольшим рядом статистических данных (2–4 протокола качества сточных вод в год) и неинструментальным учетом объема сбрасываемых поверхностных сточных вод. Однако, в соответствии с данными государственного водного кадастра, в настоящее время около 78 % выпусков дождевой канализации в водные объекты не имеет очистных сооружений.

С целью повышения достоверности учета объемов сбрасываемых поверхностных сточных вод и массы загрязняющих веществ в их составе, а также для снижения антропогенной нагрузки на поверхностные водные объекты необходима организация систем дождевой канализации с внедрением наилучших доступных технических методов сбора, транспортировки, очистки и использования поверхностных сточных вод населенных пунктов.

Анализ международного законодательства и практических подходов по обращению с поверхностными сточными водами на территориях населенных пунктов указывает, что развитые страны в последние десятилетия активно инвестируют средства в «зеленую» и «синюю» инфраструктуру для создания возможности улавливать воду там, где она выпадает, и использовать ее как ресурс до того, как она превратится в сточные воды. Это позволяет повысить устойчивость городов к экстремальным погодным и климатическим явлениям. В странах Европейского союза в настоящее время определена необходимость применения комплексного (интегрированного) подхода к управлению поверхностными сточными водами в черте населенных пунктов с учетом как количественного, так и качественного состава. Очевидно, что совершенствование национального законодательства по обращению с поверхностными сточными водами в населенных пунктах необходимо проводить комплексно, поскольку помимо законодательства в области

архитектурной, градостроительной и строительной деятельности затрагиваются вопросы законодательства в области охраны окружающей среды и законодательства в области санитарно-эпидемиологического благополучия населения [2].

Развитие национального законодательства по обращению с поверхностными сточными водами на территориях населенных пунктов должно быть направлено на закрепление в строительных нормах и строительных правилах возможности развивать принципы «синей» и «сине-зеленой» инфраструктуры. В первом приближении к законодательно закреплённому перечню возможных технических решений можно отнести «Пособие по наилучшим доступным техническим методам сбора, транспортировки, очистки и использования поверхностных сточных вод в населенных пунктах», утвержденное приказом Минприроды от 20 февраля 2024 г. № 70-ОД.

Для другой исследуемой области XI «Качество сбросов сточных вод из установок по очистке сточных вод» с целью реализации утверждены 3 задачи.

Задача 1. Сокращение массы сброса тяжелых металлов в составе сточных вод в поверхностные водные объекты после очистных сооружений. Для ее решения необходимо реализовать два целевых показателя.

Один из них – «Снижение поступления тяжелых металлов (медь, свинец, железо общее, хром общий, никель, цинк) в составе сточных вод поверхностные водные объекты (в % к уровню 2015 года): на 20 % до 2025 г. и на 25 % до 2030 г.».

Динамика изменения массы сброса тяжелых металлов (медь, свинец, железо общее, хром общий, никель, цинк) в поверхностные водные объекты за период 2015–2022 гг. на основании данных государственного водного кадастра<sup>5</sup> представлены в табл. 4.

Таблица 4

Динамика изменения массы сброса тяжелых металлов (медь, свинец, железо общее, хром общий, никель, цинк) за период 2015–2022 гг.

Table 4

Dynamics of changes in the discharge mass of metals for the period 2015–2022

| Наименование показателя | 2015  | 2016   | 2017  | 2018   | 2019   | 2020  | 2021  | 2022  | % снижения в 2022 г. к уровню 2015 г. |
|-------------------------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|---------------------------------------|
| Медь                    | 4,6   | 5,74   | 4,511 | 4,37   | 2,87   | 3,45  | 3,14  | 2,26  | 51                                    |
| Свинец                  | 0,6   | 0,71   | 0,48  | 0,50   | 0,08   | 0,059 | 0,256 | 0,056 | 91                                    |
| Железо общее            | 278,4 | 297,50 | 270,6 | 230,87 | 220,79 | 270,4 | 232,4 | 253,6 | 9                                     |
| Хром общий              | 3,2   | 2,9    | 3,0   | 3,67   | 3,00   | 3,04  | 3,87  | 2,37  | 26                                    |
| Никель                  | 2,1   | 2,6    | 4,0   | 3,78   | 3,51   | 2,52  | 4,2   | 1,45  | 31                                    |
| Цинк                    | 25,2  | 28,8   | 29,3  | 20,48  | 21,51  | 17,10 | 19,4  | 19,37 | 23                                    |

По данным табл. 4, по всем представленным тяжелым металлам наблюдается положительная динамика сокращения их сброса в поверхностные водные объекты, что позволяет сделать вывод о положительном исходе по достижению данного целевого показателя к 2025 г.

Основными водопользователями, которые осуществляют сброс тяжелых металлов в составе сточных вод, являются организации водопроводно-канализационного хозяйства (далее – ВКХ) и жилищно-коммунального хозяйства (далее – ЖКХ), что связано с отведением предприятиями производственных сточных вод, содержащих специфические загрязняющие вещества (тяжелые металлы), характерные их технологическим процессам производства (например, гальваническое производство), в централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов.

С целью сокращения сброса загрязняющих веществ в составе производственных сточных вод в централизованную систему водоотведения (канализации) нормами Правил пользования централизованными системами водоснабжения, водоотведения (канализации) в населенных пунктах, утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 30.09.2016 № 788 (далее – Правила пользования) предусмотрена повышенная плата за сброс в централизованную систему водоотведения (канализации) производственных сточных вод, негативно влияющих на работу централизованных систем водоотведения (канализации), что является одним из механизмов экономического стимулирования сокращения сброса загрязняющих веществ в составе производственных сточных вод предприятиями (реализация мероприятия 1 задачи 1).

<sup>5</sup> Государственный водный кадастр [Электронный ресурс]. URL: <http://195.50.7.216:8081/task/start/> (дата обращения: 01.03.2024).

Правила пользования регламентируют требования к приему, транспортировке и очистке производственных сточных вод предприятий, к организации приборного учета производственных сточных вод, отводимых в централизованные системы водоотведения (канализации) и к строительству, реконструкции, модернизации локальных очистных сооружений промпредприятий, оказывающих негативное воздействие на централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов, что является частью реализации мероприятий 1,2 и 3 соответственно, задачи 2 «Сокращение объемов сброса недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водные объекты».

При этом стоит отметить, что в настоящее время отсутствуют методические подходы к установлению допустимых концентраций загрязняющих веществ и показателей в составе производственных сточных вод абонентов организации ВКХ и ЖКХ, которые учитывают условия формирования городских сточных вод населенного пункта и эффективность работы действующих очистных сооружений организаций ВКХ и ЖКХ. Как следствие, это может привести к сбросу недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водные объекты, но при этом промышленными предприятиями будут соблюдены действующие условия приема производственных сточных вод в централизованные системы водоотведения (канализации) населенного пункта [3; 4].

Наиболее эффективным в решении задачи 2 «Сокращение объемов сброса недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водные объекты» является реализация мероприятия 4 «Строительство, реконструкция и модернизация очистных сооружений полной биологической очистки сточных вод централизованных коммунальных систем водоотведения (не менее 5), в том числе с привлечением средств международных финансовых организаций (2030 год)». В 2022–2023 гг. начата реализация проектов по реконструкции/модернизации коммунальных очистных сооружений в ряде крупных и малых населенных пунктов: г. Витебске, г. Гомеле, г. Минске, г. Дрогичине, н. п. Фариново, г. Речице, а. г. Гедевичи, г. Смоленичах, г. п. Радосковичи, д. Б. Уланово, д. Горбачевичи, г. Береза, г. Жабинка, н. п. Жерносеки, д. Юрцево.

Организациями ВКХ и ЖКХ ведутся активные работы по реконструкции действующих очистных сооружений и строительству новых очистных сооружений.

Во исполнение мероприятия 5 задачи 2, 24 мая 2023 г. Минприроды утвержден «План действий по сокращению сброса сточных вод в поверхностные водные объекты с превышением нормативов допустимого сброса химических и иных веществ на период 2023–2025 гг.» (далее – План). В рамках Плана территориальные органы Минприроды ежегодно проводят актуализацию перечня неэффективно работающих очистных сооружений, осуществляющих сброс сточных вод в поверхностные водные объекты (в результате их износа, перегрузки, регулярного несоблюдения нормативов допустимого сброса химических и иных веществ и другое); актуализацию перечня очистных сооружений сточных вод, для которых установлены временные нормативы допустимого сброса химических и иных веществ; и прочие действия, направленные на сокращение сброса сточных вод в поверхностные водные объекты.

Реализация мероприятий задач 1 и 2 области XI позволит наладить учет качественных и количественных характеристик сточных вод, отводимых в централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов, и далее сбрасываемых в поверхностные водные объекты. Отображением успешной реализации данных мероприятий является достижение целевого показателя «Индекс сброса недостаточно очищенных сточных вод, отводимых в поверхностные водные объекты после очистных сооружений (в % к уровню 2015 г.): 30 % до 2025 г. и 30 % до 2030 г.». Динамика объемов недостаточно очищенных сточных вод, сбрасываемых в поверхностные водные объекты, а также индекс сброса в 2022 г. к уровню 2015 г. представлены в табл. 5.

Таблица 5

Динамика объемов и индекс сброса недостаточно очищенных сточных вод, отводимых в поверхностные водные объекты

Table 5

**Dynamics of volumes and Index of discharge of insufficiently treated wastewater discharged to surface water bodies**

| Показатель                                                          | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | Индекс сброса<br>2022 г. к 2015 г., % |
|---------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------------------------------|
| Объем сброса недостаточно очищенных сточных вод, млн м <sup>3</sup> | 5,71 | 6,34 | 4,27 | 4,00 | 4,06 | 2,67 | 2,34 | 2,81 | 51%                                   |

Данные табл. 5 свидетельствуют, что наблюдается положительная динамика по снижению объемов сброса недостаточно очищенных сточных вод, позволяющая сделать вывод о достижении данного целевого показателя к 2025 г.

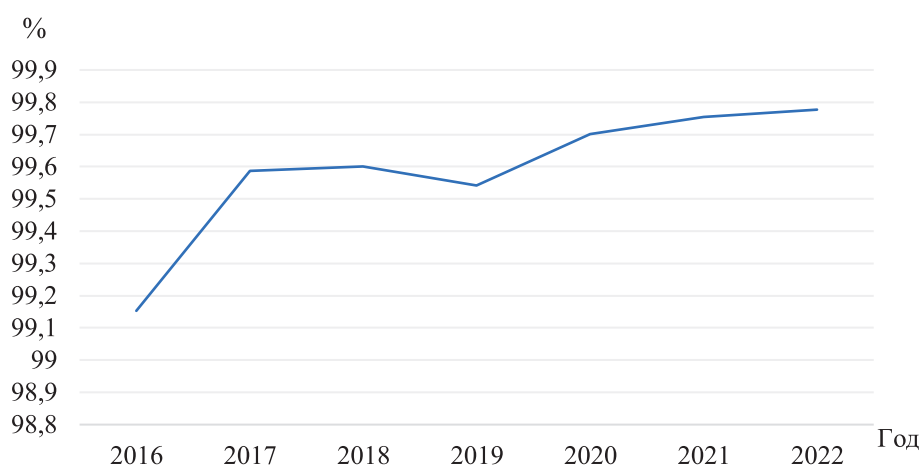
Снижение данного показателя связано с внедрением промышленными предприятиями систем оборотного водоснабжения и повторного (последовательного) водоснабжения; установление временных допустимых концентраций загрязняющих веществ и показателей для водопользователей, осуществляющих реконструкции/модернизацию или пусконаладочные работы на очистных сооружениях сточных вод.

Учитывая синергизм целевых показателей Комплекса мер по ПВЗ с показателями задачи 6.3 ЦУР 6 (табл. 1) проанализирована динамика целевого показателя 6.3.1 «Доля безопасно очищаемых хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод».

Расчет целевого показателя 6.3.1 осуществляется в соответствии с методикой расчета, утвержденной приказом Минприроды от 29.09.2017 № 271-ОД (в редакции приказа от 18.01.2024 № 27-ОД)<sup>6</sup>.

В соответствии с методикой расчета показателя 6.3.1, показатель формируется на основании официальной статистической информации по форме государственной статистической отчетности 1-вода (Минприроды) «Отчет об использовании воды», представленной в виде объема нормативно-очищенных сточных вод и недостаточно очищенных сточных вод. Так же стоит отметить, что в соответствии с методикой в редакции от 18.01.2024, при расчете данного показателя не учитывается объем сброса поверхностных сточных вод.

На рис. приведена динамика изменения показателя 6.3.1 за 2016–2022 гг. [7].



Динамика изменения показателя 6.3.1 за период 2016–2022 гг.

Dynamics of the change in indicator 6.3.1 for the period 2016–2022

Как следует из рис., наблюдается положительная динамика увеличения показателя 6.3.1, что позволяет сделать вывод о сокращении сброса недостаточно очищенных сточных вод, сбрасываемых в поверхностные водные объекты, что непосредственно связано с реализацией мероприятий по достижению области X (задача 9.1) и области XI (задачи 10.1 и 10.2).

Область XI также включает третью задачу «Увеличение доли поверхностных водных объектов, которым присвоен «хороший» и выше экологический статус», достижение которой напрямую зависит от решения задач 1 и 2, и результаты достижения задачи 3 отражаются в целевом показателе 3.1.2.

Расчет целевого показателя 6.3.2 осуществляется в соответствии с методикой расчета, утвержденной приказом Минприроды от 29.09.2017 № 271-ОД (в редакции приказа Минприроды от 18.01.2024 № 27-ОД)<sup>7</sup>.

В соответствии с методикой расчета показателя 3.1.2 исходными данными являются результаты регулярных наблюдений за состоянием поверхностных вод, формируемые в рамках Национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь.

В табл. 6 приведена динамика изменения показателя 6.3.2 за 2015–2022 гг. по водотокам и водоемам в разрезе республики и в разрезе крупных речных бассейнов Республики Беларусь.

Анализ данных табл. 6 указывает, что по водоемам наблюдается положительная динамика показателя 6.3.2, при этом по водотокам наблюдается обратная тенденция.

Снижение данного показателя может быть связано с двумя факторами. Первый, наиболее весомый фактор – сброс в водотоки водопользователями сточных вод, содержащих высокие концентрации загрязняющих веществ, установленный временно на период реконструкции, модернизации и строительства очистных сооружений, проведения пусконаладочных работ на таких очистных сооружениях. По данным 2022–2023 гг., временные нормативы допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных

<sup>6</sup>Государственный водный кадастр [Электронный ресурс]. URL: <http://195.50.7.216:8081/task/start/> (дата обращения: 01.03.2024).

<sup>7</sup>Там же.

вод установлены для 41 выпуска сточных вод в поверхностные водные объекты (без учета водопользователей, сбрасывающих поверхностные сточные воды через системы дождевой канализации). При установлении временных нормативов допустимых сбросов сточные воды водопользователей могут оказывать негативное воздействие на поверхностные водные объекты, однако при отсутствии превышений установленных временных нормативов допустимых сбросов, сточные воды таких водопользователей будут считаться нормативно очищенными.

Таблица 6

Динамика изменения показателя 6.3.2 за период 2015–2022 гг.

Table 6

Dynamics of the change in indicator 6.3.2 for the period 2015–2022

| Год  | Водоемы | Водотоки | Водотоки, бассейн р. Неман | Водотоки, бассейн р. Западная Двина | Водотоки, бассейн р. Западный Буг | Водотоки, бассейн р. Днепр | Водотоки, бассейн р. Припять |
|------|---------|----------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 2015 | –       | –        | 58                         | –                                   | 27                                | –                          | 73                           |
| 2016 | 74      | 70       | –                          | 70                                  | –                                 | 75                         | –                            |
| 2017 | –       | –        | 88                         | –                                   | 53                                | –                          | 75                           |
| 2018 | 87      | 77       | –                          | 85                                  | –                                 | 66                         | –                            |
| 2019 | –       | –        | 70                         | –                                   | 60                                | –                          | 71                           |
| 2020 | 92      | 69       | –                          | 50                                  | –                                 | 68                         | –                            |
| 2021 | –       | –        | 58                         | –                                   | 75                                | –                          | 50                           |
| 2022 | 95      | 58       | –                          | 60                                  | –                                 | 55                         | –                            |

Второй фактор – увеличение охвата учетом объемов сброса поверхностных сточных вод с территории населенных пунктов и производственных площадок промышленных предприятий, которые могут содержать высокие концентрации загрязняющих веществ, в большинстве случаев очистные сооружения дождевой канализации в ряде крупных, а также большинстве средних и малых населенных пунктов отсутствуют.

### Заключение

Республика Беларусь с 2009 г., являясь стороной Протокола по проблемам воды и здоровья, активно участвует в реализации его основных положений на международном и национальном уровне.

В 2021 г. для реализации Протокола по проблемам воды и здоровья Минздравом совместно с Минприроды и Министерством жилищно-коммунального хозяйства на основании проведенного анализа ситуации в отрасли водоснабжения и водоотведения, оценки состояния водных ресурсов утвержден Комплекс мер по реализации обязательств, принятых Республикой Беларусь по Протоколу по проблемам воды и здоровья, до 2030 г.

Комплекс мер включает задачи, перечень целевых показателей со сроками их достижения, мероприятия по достижению целевых показателей и исполнителей этих мероприятий. Комплекс мер тесно увязан с показателями целей устойчивого развития, принятыми ООН в 2015 г. Наиболее тесная взаимосвязь прослеживается с ЦУР 3 «Обеспечение здорового образа жизни и содействие благополучию для всех в любом возрасте» и ЦУР 6 «Обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов и санитарии для всех».

Реализация Комплекса мер ведется Республикой Беларусь с 2021 г. Ответственными исполнителями мероприятий определены республиканские органы государственного управления, иные организации, подчиненные Правительству по компетенции, исполнительные и распорядительные органы, организации, осуществляющие эксплуатацию систем водоотведения и другие заинтересованные.

Оценка текущего прогресса реализации задач Комплекса мер, связанных со сбросом сточных вод в окружающую среду, проводилась по двум целевым областям Протокола по проблемам воды и здоровья: область X «Частотность сбросов необработанных потоков ливневых вод из коллекторных систем для сточных вод» (1 задача и 2 целевых показателя) и область XI «Качество сбросов сточных вод из установок по очистке сточных вод» (3 задачи и 3 целевых показателя). Суммарно для решения четырех задач запланирована реализация 17 различных мероприятий институционального, научно-практического и технического

характера. Основными ответственными исполнителями мероприятий в рассматриваемых областях являются Минприроды, местные исполнительные и распорядительные органы, Минжилкомхоз, организации ВКХ, предприятия и организации, на балансе которых находятся системы дождевой канализации населенных пунктов. В исследовании проведен анализ выполнения запланированных мероприятий и оценен прогресс в достижении показателей.

В рамках целевой области X «Частотность сбросов необработанных потоков ливневых вод из коллекторных систем для сточных вод» основные мероприятия направлены на инвентаризацию их выпусков в поверхностные водные объекты и сетей дождевой канализации, что повышает учет и контроль качественных и количественных характеристик сточных вод, сбрасываемых в поверхностные водные объекты. Наблюдается положительная динамика в части инвентаризации сетей дождевой канализации организациями, являющимися балансодержателями таких сетей. Протяженность сетей дождевой канализации, находящихся в коммунальной собственности в 2023 г., по сравнению с 2022 г. увеличилась в большинстве крупных городов страны. При выявлении новых выпусков поверхностных сточных вод в водные объекты проводится их инвентаризация и расчет нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты. Выявление и инвентаризация приводит к получению водопользователем разрешений на специальное водопользование или комплексных природоохранных разрешений. Учитывая, что допустимо вести учет объемов поверхностных сточных вод неинструментальным (расчетным) методом (с учетом площади стока), то за счет увеличения трассировки сетей дождевой канализации и площади стока, охватываемой данными сетями, наблюдается увеличение объемов сброса поверхностных сточных вод в водные объекты и, как следствие, увеличение массы сбрасываемых загрязняющих веществ через дождевую канализацию. Таким образом, реализация мероприятий целевой области X позволяет усовершенствовать учет объема сбрасываемых поверхностных сточных вод, выявить дополнительные источники поступления производственных сточных вод в сети дождевой канализации, уточнить перечень загрязняющих веществ и показателей, подлежащих нормированию и контролю на выпуске в водный объект. В настоящее время около 78 % выпусков дождевой канализации в водные объекты не имеет очистных сооружений, соответственно, для повышения достоверности учета поступления массы загрязняющих веществ в водные объекты в составе поверхностных сточных вод требуется развивать систему контроля качества поверхностных сточных вод.

В краткосрочной перспективе требуется совершенствование национального законодательства в области архитектурной, градостроительной и строительной деятельности по обращению с поверхностными сточными водами на территориях населенных пунктов с внедрением принципов «зеленой» и «синей» инфраструктуры, наилучших доступных технических методов сбора, транспортировки, очистки и использования поверхностных сточных вод.

В рамках целевой области XI «Качество сбросов сточных вод из установок по очистке сточных вод» основные мероприятия направлены на сокращение массы сброса тяжелых металлов в составе сточных вод в поверхностные водные объекты после очистных сооружений. Как показывает динамика массы сброса тяжелых металлов (медь, свинец, железо общее, хром общий, никель, цинк) за период 2020–2022 гг., практически по всем металлам наблюдается положительная тенденция сокращения их сброса в поверхностные водные объекты. Однако поскольку основными предприятиями, которые осуществляют сброс тяжелых металлов в поверхностные водные объекты, являются организации ВКХ и ЖКХ (с учетом исторически сложившейся системы водоотведения в населенных пунктах страны), то необходимо совершенствование национального законодательства в части требований по строительству локальных очистных сооружений при сбросе производственных сточных вод, содержащих специфические загрязняющие вещества, в централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов, а также совершенствование методических подходов к установлению допустимых концентраций загрязняющих веществ и показателей в составе производственных сточных вод. Методические подходы должны учитывать условия формирования городских сточных вод и эффективность работы очистных сооружений сточных вод населенного пункта, эксплуатируемых организаций ВКХ или ЖКХ.

Для сокращения объемов сброса недостаточно очищенных сточных вод в поверхностные водные объекты, основной объем которых также приходится на предприятия ВКХ и ЖКХ, наиболее эффективным является строительство, реконструкция и модернизация очистных сооружений полной биологической очистки сточных вод коммунальных систем водоотведения населенных пунктов. В 2022–2023 гг. начата реализация проектов по реконструкции (модернизации) коммунальных очистных сооружений в ряде крупных и малых населенных пунктов: г. Витебск, г. Гомель, г. Минск, г. Дрогичин, н.п. Фариново, г. Речица, а. г. Гедевичи, г. Смолевичи, г. п. Радошковичи, д. Б. Уланово, д. Горбачевичи, г. Береза, г. Жабинка, н. п. Жерносеки, д. Юрцево.

Реализация практических мероприятий по снижению поступления загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты по целевой области XI «Качество сбросов сточных вод из установок по

очистке сточных вод» должна подтверждаться положительной динамикой по задаче «Увеличение доли поверхностных водных объектов, которым присвоен "хороший" и выше экологический статус». Однако за 2020–2022 гг. экологический статус водотоков практически во всех речных бассейнах ухудшился. Это связано с двумя основными факторами: установление предприятиям временных нормативов допустимых сбросов (повышенные концентрации загрязняющих веществ) на период реконструкции и модернизации очистных сооружений, проведения пусконаладочных работ на таких очистных сооружениях, а также с увеличением охвата учетом объемов сброса поверхностных сточных вод через системы дождевой канализации населенных пунктов, на которых требуется строительство очистных сооружений.

### Библиографические ссылки

1. Дубенок СА, Кулаков АЮ. *Имплементация показателей целей устойчивого развития, связанных с водой: опыт Республики Беларусь*. Минск: Четыре четверти; 2020. 126 с.
2. Дубенок СА, Шавейко КН. Современные международные подходы по управлению поверхностными сточными водами на территориях населенных пунктов и возможности их применения в Беларуси. В: *Технологическая независимость и конкурентоспособность Союзного Государства, стран СНГ, ЕАЭС и ШОС. Сборник статей VI Международной научно-технической конференции «Минские научные чтения-2023»*, Минск, 06–08 декабря 2023 г. Минск: БГТУ; 2023. Том 3. 392 с.
3. Голод ЮВ, Дубенок СА. Совершенствование методических подходов к учету хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих на очистные сооружения населенных пунктов Республики Беларусь. *Журнал Белорусского государственного университета Экология*. 2021;4:89–102.
4. Голод ЮВ, Дубенок СА. Совершенствование подходов к нормированию сбросов сточных вод в окружающую среду через централизованные системы канализации населенных пунктов. *Природные ресурсы*. 2021;2:49–58.

### References

1. Dubenok SA, Kulakov AYU. *Implementatsiya pokazatelej celej ustojchivogo razvitiya, svyazannyh s vodoj: opyt Respubliki Belarus* [Implementation of indicators of sustainable development goals related to water: the experience of the Republic of Belarus]. Minsk: Chetyre chetverti; 2020. 126 p. Russian.
2. Dubenok SA, Shaveiko KN. *Sovremennyye mezhdunarodnyye podkhody po upravleniyu poverkhnostnymi stochnymi vodami na territoriyakh naseleennykh punktov i vozmozhnosti ikh primeneniya v Belarusi* [Modern international approaches to the management of surface wastewater in the territories of populated areas and the possibility of their application in Belarus]. In: *Technological independence and competitiveness of the Union State, CIS countries, EAEU and SCO. Collection of articles VI International scientific-technical conference «Minsk Scientific Readings-2023»*. Minsk, 2023 December 06–08. Minsk: BSTU; 2023. Volume 3. 392 p. Russian.
3. Holad YuV, Dubianok SA. *Sovershenstvovaniye metodicheskikh podkhodov k uchetu khozyaystvenno-bytovykh stochnykh vod, postupyayushchikh na ochistnyye sooruzheniya naseleennykh punktov Respubliki Belarus* [Improvement of methodological approaches to accounting of household wastewater supplied to treatment facilities in settlements of the Republic of Belarus]. *Journal of Belarusian State University. Ecology*. 2021;4:89–102. Russian.
4. Golod YuV, Dubianok SA. *Sovershenstvovaniye podkhodov k normirovaniyu sbrosov stochnykh vod v okruzhayushchuyu sredu cherez sistemy kanalizatsii naseleennykh punktov* [Improving approaches to the regulation of wastewater discharges into the environment through the sewerage systems of settlements]. *Natural resources*. 2021;2:49–58. Russian.

Статья поступила в редколлегию 04.06.2024.  
Received by editorial board 04.06.2024.

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ СТРОНЦИЕМ-90: ДИНАМИКА И ТЕРРИТОРИАЛЬНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ

Н. Н. ЦЫБУЛЬКО<sup>1)</sup>, В. В. ЖУРАВКОВ<sup>1)</sup>, В. Б. ЦЫРИБКО<sup>2)</sup>, Е. В. АЛЕКСЕЙЧИК<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси  
ул. Казинца, 90, 220108, г. Минск, Беларусь

По материалам последнего тура обследования представлен анализ динамики современного состояния и территориального распределения загрязненных стронцием-90 почв пахотных и луговых земель. За длительный послепериод в результате естественного распада радионуклидов площади земель, загрязненных стронцием-90, сократились в два раза. В настоящее время аграрное производство ведется на 271,06 тыс. га земель, загрязненных этим радионуклидом с плотностью 0,15–3,00 Ки/км<sup>2</sup>, что составляет около 3,6 % от общей площади сельскохозяйственного землепользования республики. Существенно изменилось соотношение площадей и удельного веса почв сельскохозяйственных земель по плотностям радиоактивного загрязнения. Из общей площади земель на долю с плотностью загрязнения 0,15–0,30 Ки/км<sup>2</sup> приходится 62 %, 0,31–1,00 Ки/км<sup>2</sup> – 34 % и 1,01–3,00 Ки/км<sup>2</sup> – 4 %. Основные массивы (около 96 %) их сосредоточены в районах Гомельской обл. По административным районам удельный вес загрязненных земель изменяется от менее чем 0,1 до 96,4 % от общей площади сельскохозяйственного землепользования района. В аграрном землепользовании в 11 районах находится 103,2 тыс. га земель, загрязненных стронцием-90 с плотностью 0,31–3,00 Ки/км<sup>2</sup>, где наблюдается превышение референтных уровней содержания радионуклида в растениеводческой продукции, прежде всего в зерне на пищевые цели. Площади таких земель по районам колеблются в широких пределах, однако основные массивы их сконцентрированы в Брагинском (39,5 тыс. га) и Хойникском (37,8 тыс. га) р-нах Гомельской обл. В этих двух районах находится 75 % всех пахотных и луговых земель, загрязненных стронцием-90 с плотностью выше 0,30 Ки/км<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** радиоактивное загрязнение; стронций-90; почвы; пахотные земли; луговые земли.

**Благодарность.** Коллектив авторов выражает благодарность сотрудникам отдела мелиорации и радиологии Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь за предоставленную информацию о радиоактивном загрязнении сельскохозяйственных земель в Республике Беларусь.

### Образец цитирования:

Цыбулько НН, Журавков ВВ, Цырибко ВБ, Алексейчик ЕВ. Загрязнение почв сельскохозяйственных земель стронцием-90: динамика и территориальное распространение. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2024;3:100–107.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-100-107>

### For citation:

Tsybulka MM, Zhuravkov VV, Tsyribko VB, Alekseychik EV. Soil contamination of agricultural land with strontium-90: dynamics and spatial distribution. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2024;3:100–107. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-3-100-107>

### Авторы:

**Николай Николаевич Цыбулько** – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; начальник научно-исследовательского сектора.

**Владислав Владимирович Журавков** – кандидат биологических наук, доцент; заместитель директора по учебной работе.

**Виктор Борисович Цырибко** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; заведующий лабораторией агрофизических свойств и защиты почв от эрозии.

**Елена Валерьевна Алексейчик** – аспирант кафедры экологического мониторинга и менеджмента.

### Authors:

**Mikalai M. Tsybulka**, doctor of science (agriculture), full professor; head of the research sector.  
[nik.nik1966@tut.by](mailto:nik.nik1966@tut.by)

**Vladislav V. Zhuravkov**, PhD (biology), docent; deputy director for academic affairs.

**Viktor B. Tsyribko**, PhD (agriculture), docent; head of the laboratory of agrophysical properties and protection of soil erosion.

**Elena V. Alekseychik**, graduate student at the department of environmental monitoring and management.  
[id@iseu.by](mailto:id@iseu.by)

## SOIL CONTAMINATION OF AGRICULTURAL LAND WITH STRONTIUM-90: DYNAMICS AND SPATIAL DISTRIBUTION

M. M. TSYBULKA<sup>a</sup>, V. V. ZHURAVKOV<sup>a</sup>, V. B. TSYRIBKO<sup>b</sup>, E. V. ALEKSEYCHIK<sup>a</sup>

<sup>a</sup>International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,  
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

<sup>b</sup>Institute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences  
of Belarus, 90 Kazinka Street, Minsk 220108, Belarus

Corresponding author: M. M. Tsybulka (nik.nik1966@tut.by)

The analysis of dynamics, current state and spatial distribution of strontium-90 contaminated soils of arable and meadow lands based on the last round of their survey is presented. For a long post-accident period, the areas of lands contaminated with strontium-90 have decreased twice as a result of natural decay of radionuclides. At present, agricultural production is carried out on 271,06 thousand ha of lands contaminated with this radionuclide with the density of contamination 0,15–3,00 Ci/km<sup>2</sup> that makes about 3,6 % of the total area of agricultural land of the republic. The ratio of the areas and distribution of agricultural lands by densities of radioactive contamination has significantly changed. The share of land with density of contamination 0,15–0,30 Ci/km<sup>2</sup> is 62 % from the total area of the lands; with density of 0,31–1,00 Ci/km<sup>2</sup> – 34 % and with density of 1,01–3,00 Ci/km<sup>2</sup> – 4%. The contaminated with <sup>90</sup>Sr land is mainly situated in the Gomel region (96 %). By administrative districts the share of contaminated lands varies from less than 0.1 to 96.4 % of the total area of agricultural land in the district. In agrarian land use in 11 districts there are 103,2 thousand ha of lands contaminated with strontium-90 with density of 0,31–3,00 Ci/km<sup>2</sup>, where exceeding of reference levels of radionuclide content in crop production, first of all, in grain for food purposes is observed. The areas of such lands vary widely by districts, however, the main massifs of such lands are concentrated in Bragin (39.5 thousand ha) and Khoyniki (37.8 thousand ha) districts of Gomel region. These two districts contain 75 % of all arable and meadow lands contaminated with strontium-90 with density higher than 0.30 Ci/km<sup>2</sup>.

**Keywords:** radioactive contamination; strontium-90; soils; arable lands; meadow lands.

**Acknowledgments.** The team of authors expresses gratitude to the staff of the Department of Land Melioration and Radiology of the Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Belarus for providing information on radioactive pollution of agricultural lands in the Republic of Belarus.

### Введение

Авария на Чернобыльской АЭС наиболее крупная радиационная катастрофа, приведшая к выбросу в атмосферу около 200 различных радионуклидов с периодами полураспада от нескольких часов до сотен тысяч лет. Их совокупность оценивается величиной порядка 14 эксабеккерелей (ЭБк) [1; 2].

Пространственные особенности чернобыльских выпадений состоят, во-первых, в масштабах радиоактивного загрязнения, что обусловлено значительной высотой выброса продуктов горения (до 7 км), а во-вторых, в неоднородности (мозаичности) территориального распределения радиоактивных веществ [3].

Радионуклиды присутствуют практически во всех компонентах экосистем, вовлечены в геохимические и трофические цепи миграции, определяют необходимость ведения хозяйственной деятельности в условиях радиоактивного загрязнения в течение длительного периода времени. Значительные площади загрязнены долгоживущими биологически значимыми радионуклидами – цезием-137 (<sup>137</sup>Cs) и стронцием-90 (<sup>90</sup>Sr). Более локально и существенно меньшие территории загрязнены изотопами плутония (<sup>238</sup>, <sup>239+240</sup>, <sup>241</sup>Pu) и америцием-241 (<sup>241</sup>Am).

В результате естественного распада радионуклидов наблюдается постепенное снижение плотности загрязнения и площади загрязненной территории Беларуси. Так, площадь радиоактивного загрязнения цезием-137 уменьшилась в 1,8 раза и составляет 25,49 тыс. км<sup>2</sup> или 12,3 % общей площади страны. Территория, загрязненная стронцием-90, сократилась в 1,9 раза – с 21,1 до 11,8 тыс. км<sup>2</sup>. Территория, загрязненная плутонием-238,239,240, составляет 1,3 % площади республики [4].

Одним из наиболее тяжелых эколого-экономических последствий чернобыльской катастрофы явилось радиоактивное загрязнение земель сельскохозяйственного назначения.

Цель исследования – на основе материалов крупномасштабных агрохимических и радиационных обследований провести анализ динамики, современного состояния и территориального распределения загрязненных стронцием-90 почв сельскохозяйственных (пахотных и луговых) земель.

### Материалы и методы исследования

Объектом исследований выступали почвы пахотных и луговых земель, загрязненные стронцием-90 с плотностью от 0,15 Ки/км<sup>2</sup> (5,55 кБк/м<sup>2</sup>) до 3,00 Ки/км<sup>2</sup> (111,00 кБк/м<sup>2</sup>), находящиеся в пользовании сельскохозяйственных организаций административных районов республики, расположенных на территории радиоактивного загрязнения.

Территория радиоактивного загрязнения характеризуется широким разнообразием типов почв, обусловленным степенью их увлажнения, гранулометрическим составом почвообразующих и подстилающих пород, антропогенной преобразованностью [5].

Предметом исследования являлись основные закономерности и тенденции динамики и территориального распространения загрязнения почв пахотных и луговых земель стронцием-90.

Результаты исследования и их обсуждение

В Беларуси загрязнению стронцием-90 с плотностью выше 0,15 Ки/км<sup>2</sup> (выше 5,55 кБк/м<sup>2</sup>) подверглось около 650 тыс. га сельскохозяйственных земель (около 7 % их общей площади) в 28 административных районах Беларуси. Часть земель с высокой плотностью загрязнения была выведена из хозяйственного оборота.

Согласно действующей методике [6], почвы сельскохозяйственных земель при их крупномасштабном агрохимическом и радиационном обследовании подразделяются на 7 степеней по плотности загрязнения стронцием-90 – от менее 0,15 Ки/км<sup>2</sup> (менее 5,55 кБк/м<sup>2</sup>) до 3,00 Ки/км<sup>2</sup> и выше (111,00 кБк/м<sup>2</sup> и выше) (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Градация почв по степени загрязнения стронцием-90 [6]

T a b l e 1

Gradation of soils according to the degree of contamination with strontium-90 [6]

| Степень загрязнения | Плотность загрязнения <sup>137</sup> Cs, Ки/км <sup>2</sup> | Обозначение на картограммах (цвет) |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 1                   | Менее 0,15                                                  | Не окрашивается                    |
| 2                   | 0,15–0,30                                                   | Голубой                            |
| 3                   | 0,31–0,50                                                   | Синий                              |
| 4                   | 0,51–1,00                                                   | Зеленый                            |
| 5                   | 1,01–2,00                                                   | Желтый                             |
| 6                   | 2,01–2,99                                                   | Оранжевый                          |
| 7                   | 3,00 и более                                                | Красный                            |

В результате радиоактивного распада происходит постепенное уменьшение площади земель с контролируемой минимальной плотностью загрязнения стронцием-90 0,15 Ки/км<sup>2</sup> и выше, перевод их в категорию незагрязненных. Площадь загрязненных сельскохозяйственных земель сократилась за период с 1996 по 2024 г. с 555,1 до 271,1 тыс. га. В категорию незагрязненных перешло 284,0 тыс. га земель или 51 % ранее загрязненных (рис. 1).

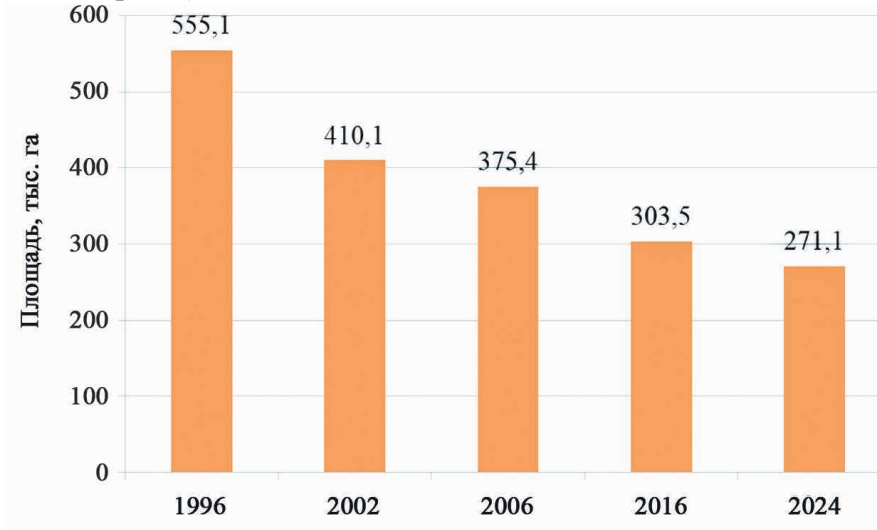


Рис. 1. Динамика площадей сельскохозяйственных земель Республики Беларусь, загрязненных стронцием-90 с плотностью 5,55 кБк/м<sup>2</sup> и выше

Fig. 1. Dynamics of the areas of agricultural lands of the Republic of Belarus contaminated with strontium-90 with a density of 5.55 kBq/m<sup>2</sup> and above

За длительный послеаварийный период существенно изменилось соотношение площадей и удельного веса почв сельскохозяйственных земель по плотностям радиоактивного загрязнения. Так, в 2006 г. из общей площади почв сельскохозяйственных земель, загрязненных стронцием-90, на долю с плотностью загрязнения 0,15–0,30 Ки/км<sup>2</sup> приходилось 56 %, с плотностью 0,31–1,00 Ки/км<sup>2</sup> – 35% и с плотностью 1,01–3,00 Ки/км<sup>2</sup> – 9 %.

В дальнейшем наблюдалось уменьшение удельного веса земель с плотностью загрязнения от 1,01 до 3,00 Ки/км<sup>2</sup> и, соответственно, увеличение доли земель с плотностью загрязнения 0,15–0,30 Ки/км<sup>2</sup>. Так, по данным крупномасштабного агрохимического и радиационного обследования почв, в 2016 г. из общей площади сельскохозяйственных земель, загрязненных стронцием-90, их удельный вес с плотностью загрязнения 0,15–0,30 Ки/км<sup>2</sup> составлял 59 %, с плотностью 0,31–1,00 Ки/км<sup>2</sup> – 35 и с плотностью 1,01–3,00 Ки/км<sup>2</sup> – 6 % (рис. 2).

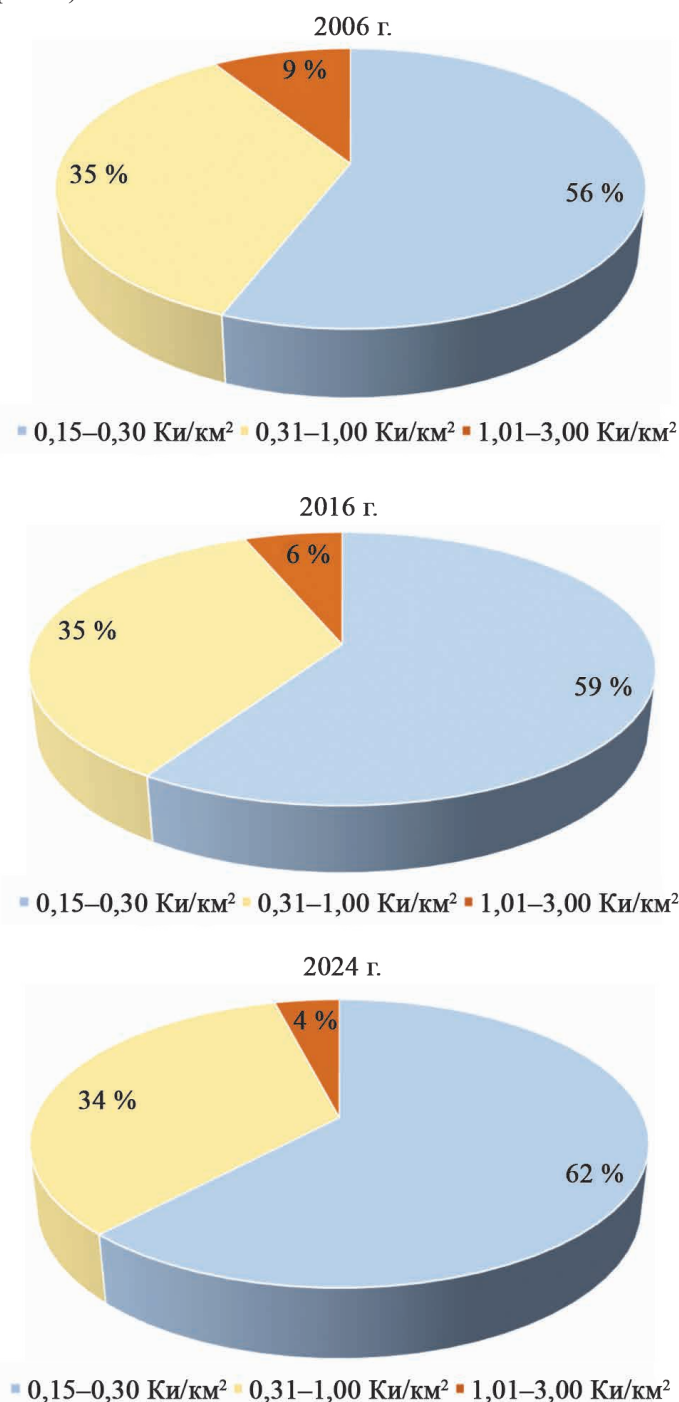


Рис. 2. Динамика соотношения удельного веса почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь по плотностям загрязнения стронцием-90

Fig. 2. Dynamics of the ratio of the specific gravity of soils of agricultural lands of the Republic of Belarus according to the density of contamination with strontium-90

По состоянию на 01.01.2024, согласно данным последнего тура агрохимического и радиационного обследования почв пахотных и луговых земель сельскохозяйственных организаций Беларуси, аграрное производство ведется на 271,06 тыс. га земель, загрязненных стронцием-90 с плотностью 0,15–3,00 Ки/км<sup>2</sup>, что составляет около 3,6 % от общей площади сельскохозяйственных земель республики. Пахотные земли занимают 188,36 тыс. га (69,5 %), луговые земли – 82,70 тыс. га (30,5 %).

В составе загрязненных стронцием-90 пахотных и луговых земель на земли с плотностью загрязнения 0,15–0,30 Ки/км<sup>2</sup> приходится 61,9 % (167,84 тыс. га), 0,30–1,00 Ки/км<sup>2</sup> – 34,1 % (92,30 тыс. га) 1,01–3,00 Ки/км<sup>2</sup> – 4 % (10,90 тыс. га) соответственно (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Экспликация сельскохозяйственных земель Республики Беларусь  
по плотности загрязнения стронцием-90 (по состоянию на 01.01. 2024 г.)

T a b l e 2

Explication of agricultural lands of the Republic of Belarus according to the density  
of contamination with strontium-90 (as of 01.01.2024)

| Республика,<br>область                  | Всего >0,15 Ки/км <sup>2</sup> |                 | В том числе по плотностям загрязнения, Ки/км <sup>2</sup> |                 |           |      |           |      |
|-----------------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------|-----------------|-----------|------|-----------|------|
|                                         |                                |                 | 0,15–0,30                                                 |                 | 0,31–1,00 |      | 1,01–3,00 |      |
|                                         | тыс. га                        | % <sup>1)</sup> | тыс. га                                                   | % <sup>2)</sup> | тыс. га   | %    | тыс. га   | %    |
| Сельскохозяйственные земли              |                                |                 |                                                           |                 |           |      |           |      |
| <b>По Беларуси</b>                      | 271,06                         | 3,6             | 167,84                                                    | 61,9            | 92,30     | 34,1 | 10,90     | 4,0  |
| Брестская                               | 0,09                           | 0,01            | 0,09                                                      | 100,0           | –         | –    | –         | –    |
| Гомельская                              | 261,05                         | 21,3            | 157,83                                                    | 60,5            | 92,30     | 35,4 | 10,90     | 4,2  |
| Могилевская                             | 9,92                           | 0,9             | 9,92                                                      | 100,0           | –         | –    | –         | –    |
| Пахотные земли и многолетние насаждения |                                |                 |                                                           |                 |           |      |           |      |
| <b>По Беларуси</b>                      | 188,36                         | 3,6             | 117,93                                                    | 62,6            | 62,36     | 33,1 | 8,08      | 4,3  |
| Брестская                               | 0,09                           | 0,01            | 0,09                                                      | 100,0           | –         | –    | –         | –    |
| Гомельская                              | 181,20                         | 20,1            | 110,77                                                    | 61,1            | 62,36     | 34,4 | 8,08      | 4,5  |
| Могилевская                             | 7,07                           | 0,9             | 7,07                                                      | 100,0           | –         | –    | –         | –    |
| Луговые земли                           |                                |                 |                                                           |                 |           |      |           |      |
| <b>По Беларуси</b>                      | 82,70                          | 3,6             | 49,91                                                     | 60,3            | 29,98     | 36,2 | 2,81      | 3,40 |
| Брестская                               | –                              | –               | –                                                         | –               | –         | –    | –         | –    |
| Гомельская                              | 79,85                          | 24,5            | 47,06                                                     | 58,9            | 29,98     | 37,5 | 2,81      | 3,5  |
| Могилевская                             | 2,85                           | 0,9             | 2,85                                                      | 100,0           | –         | –    | –         | –    |

Примечание. <sup>1)</sup> Процент от наличия сельскохозяйственных земель в области, республике; <sup>2)</sup> процент от «всего земель >0,15 Ки/км<sup>2</sup>».

Анализ экспликации загрязненных стронцием-90 земель Республики Беларусь свидетельствует, что основные массивы их сосредоточены в Гомельской обл. – 261,05 тыс. га и составляет 96,3 % от общей площади загрязненных земель. В Могилевской обл. площадь таких земель значительно меньше – 9,92 тыс. га.

Рассматривая структуру радиоактивного загрязнения земель по областям республики, можно отметить следующее. В составе загрязненных стронцием-90 пахотных и луговых земель в Гомельской обл., земли с плотностью загрязнения 0,15–0,30 Ки/км<sup>2</sup> занимают 60,5 % (157,83 тыс. га), с плотностью 0,31–1,00 Ки/км<sup>2</sup> – 35,4 % (92,30 тыс. га) и с плотностью 1,01–3,00 Ки/км<sup>2</sup> – 4,2% (10,90 тыс. га). В Могилевской и Брестской областях сельскохозяйственные земли загрязнены стронцием-90 только с плотностью 0,15–0,30 Ки/км<sup>2</sup>.

Из 118 административных районов Беларуси в 22 из них имеются сельскохозяйственные земли, загрязненные стронцием-90. По районам площади загрязненных земель колеблются в очень широких пределах – удельный вес их изменяется от менее 0,1 до 96,4 % от общей площади сельскохозяйственного землепользования района. В зависимости от удельного веса земель, загрязненных стронцием-90 от общей площади их в республике, все районы разделены на 4 группы. Первую группу представляют районы, в которых доля таких земель составляет до 1 %, вторую – районы с долей >1–5 %, третью – с долей >5–10 % и четвертую группу – районы с долей загрязненных земель >10 % (рис. 3).

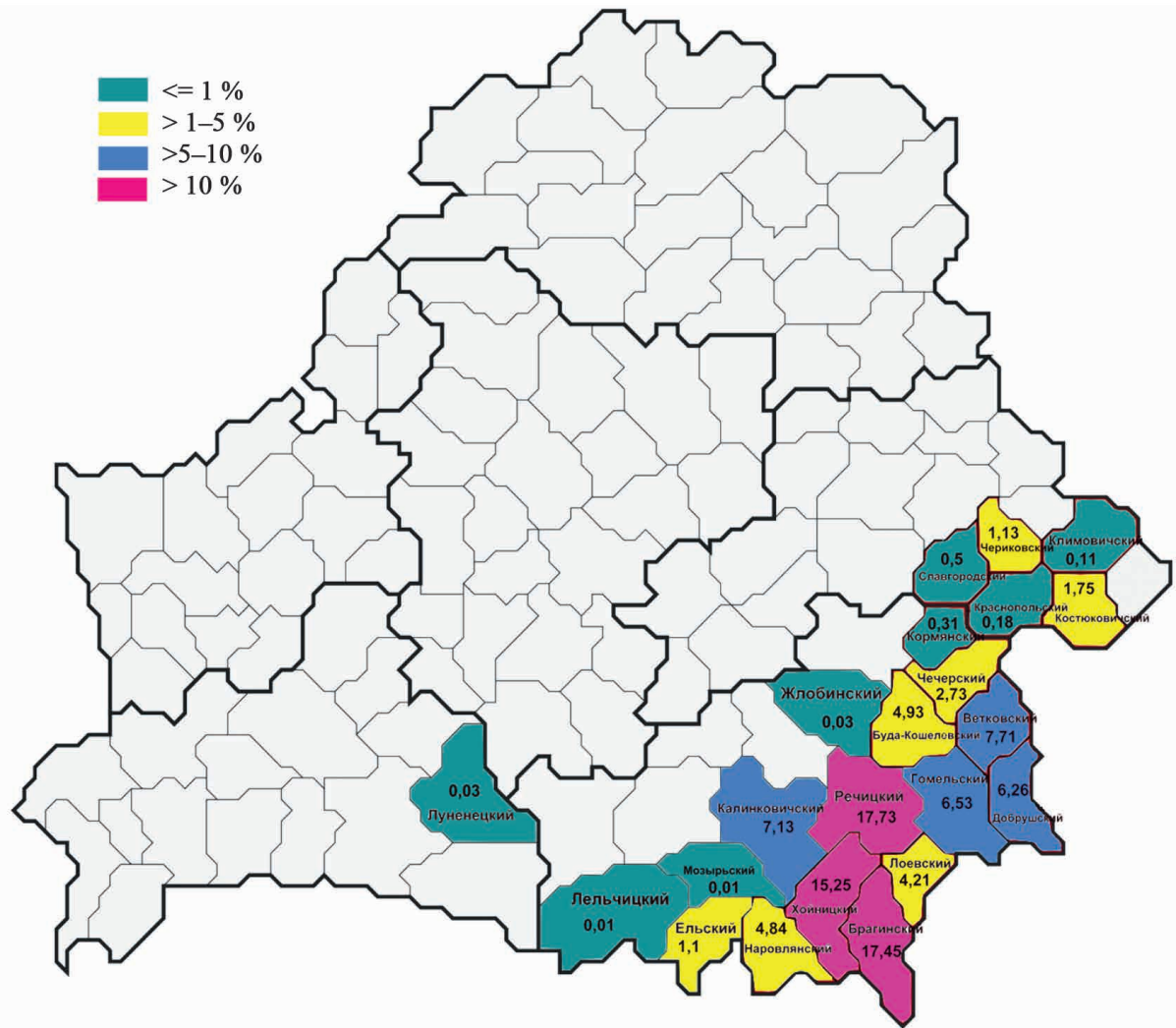


Рис. 3. Картограмма распределения административных районов по удельному весу (в процентах) загрязненных стронцием-90 сельскохозяйственных земель

Fig. 3. Cartogram of the distribution of administrative districts by specific gravity (in percent) of agricultural land contaminated with strontium-90

В восьми районах (Жлобинском, Лельчицком, Лунинецком, Климовичском, Кормянском, Краснополяском, Мозырском, Славгородском) загрязненные стронцием-90 земли занимают менее 1 %, а площади их колеблются от 30 до 1352 га. В семи районах доля загрязненных стронцием-90 земель составляет 1,1–5,0 %. В эту группу входят Буда-Кошелевский, Ельский, Костюковичский, Лоевский, Наровлянский, Чериковский и Чечерский районы. До 10 % загрязненных стронцием-90 сельскохозяйственных земель в Ветковском, Гомельском, Добрушском и Калинковичском районах. Наибольшие площади (более 10 %), загрязненных стронцием-90 земель, в Брагинском, Речицком и Хойникском р-нах Гомельской обл.

В настоящее время в аграрном землепользовании Гомельской обл. находится 103,2 тыс. га земель, загрязненных стронцием-90, с плотностью 0,31 Ки/км<sup>2</sup> и выше (рис. 4), где наблюдается систематическое превышение референтных (допустимых) уровней загрязнения растениеводческой продукции, прежде всего зерна на пищевые цели [7].

Из 22 административных районов, в которых имеются загрязненные стронцием-90 земли, в 11 часть их загрязнена с плотностью 0,31–3,00 Ки/км<sup>2</sup>. Площади таких земель по районам колеблются в широких пределах. Незначительное количество их в Буда-Кошелевском (762 га), Гомельском (886 га) и Чечерском (790 га) р-нах. В Ветковском, Лоевском, Наровлянском и Речицком р-нах площади их колеблются от 1568 до 4774 га. В Добрушском и Калинковичском р-нах площади составляют 6260 и 5346 га соответственно. Однако основные массивы земель, загрязненных стронцием-90 с плотностью 0,31–3,00 Ки/км<sup>2</sup>, сконцентрированы в Брагинском (39507 га) и Хойникском (37780 га) р-нах. В двух последних районах находится 75 % пахотных и луговых земель, загрязненных стронцием-90 с плотностью выше 0,30 Ки/км<sup>2</sup>.

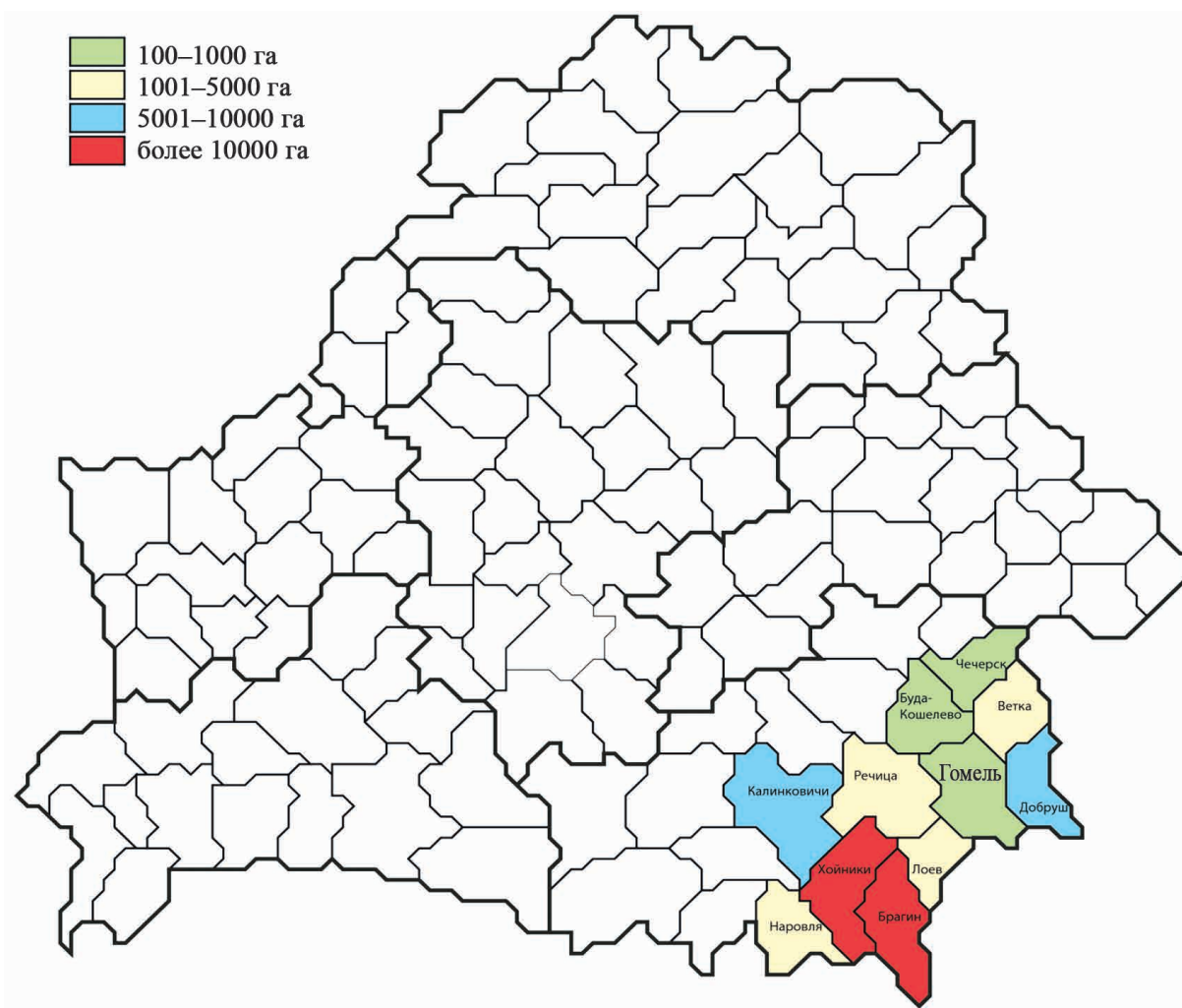


Рис. 4. Картограмма распределения площадей сельскохозяйственных земель, загрязненных стронцием-90 с плотностью выше 0,30 Ки/км² (по административным районам)

Fig. 4. Cartogram of the distribution of areas of agricultural land contaminated with strontium-90 with a density above 0.30 Ci/km², by administrative region

### Заключение

За 38-летний послеаварийный период в результате естественного распада радионуклидов площади используемых сельскохозяйственных земель, загрязненных стронцием-90, сократились в два раза. В настоящее время аграрное производство ведется на 271,06 тыс. га земель, загрязненных стронцием-90 с плотностью 0,15–3,00 Ки/км², что составляет около 3,6 % от общей площади сельскохозяйственного землепользования республики.

Существенно изменилось соотношение площадей и удельного веса почв сельскохозяйственных земель по плотностям радиоактивного загрязнения стронцием-90. В настоящее время из общей площади почв сельскохозяйственных земель, загрязненных им, 62 % приходится на плотность загрязнения 0,15–0,30 Ки/км², 34 % – на плотность 0,31–1,00 Ки/км² и 4 % – на плотность 1,01–3,00 Ки/км².

Загрязненные стронцием-90 земли имеются в 22 административных районах Беларуси. Основные массивы (96,3 %) их сосредоточены в районах Гомельской обл. По районам удельный вес загрязненных земель изменяется от менее чем 0,1 до 96,4 % от общей площади сельскохозяйственного землепользования района.

В настоящее время в аграрном землепользовании в 11 районах Гомельской обл. находится 103,2 тыс. га земель, загрязненных стронцием-90 с плотностью 0,31–3,00 Ки/км², где наблюдается систематическое превышение референтных (допустимых) уровней загрязнения растениеводческой продукции, прежде всего зерна на пищевые цели. Площади таких земель по районам колеблются в широких пределах. Однако основные массивы их сконцентрированы в Брагинском (39,5 тыс. га) и Хойникском (37,8 тыс. га) р-нах.

В них районах находится 75 % всех пахотных и луговых земель, загрязненных стронцием-90 с плотностью выше 0,30 Ки/км<sup>2</sup>.

### Библиографические ссылки

1. Экологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС и их преодоление. Двадцатилетний опыт. В: Доклад экспертной группы «Экология» Чернобыльского форума. Вена: МАГАТЭ, 2008. 180 с.
2. Санжарова НИ, Фесенко СВ, редакторы. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий. Москва: РАН; 2018. 278 с.
3. Израэль ЮА, и др. Радиоактивное загрязнение природных сред в зоне аварии на Чернобыльской АЭС. *Метеорология и гидрология*. 1987;2:5–18.
4. 35 лет после чернобыльской катастрофы: итоги и перспективы преодоления ее последствий. В: Национальный доклад Республики Беларусь. Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. Минск: ИВЦ Минфина, 2020. 152 с.
5. Смеян НИ, и др. Номенклатурный список почв Беларуси (для целей крупномасштабного картографирования). Минск: [б. и.]; 2003. 43 с.
6. Богдевич И.М, и др. Методика крупномасштабного агрохимического и радиационного обследования почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь. Национальная академия наук Беларуси, Институт почвоведения и агрохимии. Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси; 2020. 45 с.
7. Цыбулько НН. Почвенно-агрохимические основы адаптивного использования загрязненных радионуклидами земель. Минск: ИВЦ Минфина; 2022. 290 с.

### Reference

1. *Ekologicheskie posledstviya avarii na CHernobyl'skoj AES i ih preodolenie. Dvadcatiletnij opyt. V: Doklad ekspertnoj grupy «Ekologiya» CHernobyl'skogo foruma* [Environmental consequences of the Chernobyl accident and their overcoming. Twenty years of experience. In: Report of the expert group «Ecology» of the Chernobyl Forum]. Vienna: IAEA; 2008. 180 p. Russian.
2. Sanzharova NI, Fesenko SV, editors. *Radioekologicheskie posledstviya avarii na CHernobyl'skoj AES: biologicheskie efekty, migraciya, rehabilitaciya zagryaznennyh territorij* [Radioecological consequences of the Chernobyl accident: biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas]. Moscow: RAS; 2018. 278 p. Russian.
3. Israel YuA, et al. *Radioaktivnoe zagryaznenie prirodnyh sred v zone avarii na Chernobyl'skoj AES* [Radioactive pollution of natural environments in the zone of the Chernobyl accident]. *Meteorologiya I gidrologiya* [Meteorology and hydrology]. 1987;2:5–18. Russian.
4. *35 let posle chernobyl'skoj katastrofy: itogi i perspektivy preodoleniya ee posledstvij. V: Nacional'nyj doklad Respubliki Belarus'* [35 years after the Chernobyl disaster: results and prospects of overcoming its consequences. In: National report of the Republic of Belarus. Department for the Elimination of the Consequences of the Chernobyl disaster of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus]. Minsk: IVC of the Ministry of Finance; 2020. 152 p. Russian.
5. Smeyan NI, et al. *Nomenklaturnyj spisok pochv Belarusi (dlya celej krupnomasshtabnogo kartografirovaniya)* [Nomenclature list of soils of Belarus (for the purposes of large-scale mapping)]. Minsk: [publisher unknown]; 2003. 43 p. Russian.
6. Bogdevich IM, et al. *Metodika krupnomasshtabnogo agrohimicheskogo i radiacionnogo obsledovaniya pochv sel'skohozyajstvennyh zemel' Respubliki Belarus'* [Methodology of large-scale agrochemical and radiation examination of soils of agricultural lands of the Republic of Belarus. National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Soil Science and Agrochemistry]. Minsk: Institute of System Research in Agriculture of the National Academy of Sciences of Belarus; 2020. 45 p. Russian.
7. Tsybulka NN. *Pochvenno-agrohimicheskie osnovy adaptivnogo ispol'zovaniya zagryaznennyh radionuklidami zemel'* [Soil-agrochemical basis for the adaptive use of land contaminated with radionuclides]. Minsk: Information Computing Center of the Ministry of Finance; 2022. 290 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 05.08.2024.  
Received by editorial board 05.08.2024.

## СОДЕРЖАНИЕ

### СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Шиманская О. Ю.</i> Воспитательный потенциал учебной дисциплины «Иностранный язык» в контексте целей устойчивого развития .....        | 4  |
| <i>Буткевич Ю. И.</i> Методологические основы формирования экологического сознания в практике преподавания лингвистических дисциплин..... | 11 |

### ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

|                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Добыш К. В., Куликова Е. Я., Ермоленкова Г. В.</i> Флористическое разнообразие луговой растительности поймы реки Днепр в пределах Республики Беларусь .....                              | 17 |
| <i>Шавалда Е. С., Комар А. Ю., Судник А. В., Батян А. Н.</i> Придорожные фитоценозы в условиях эрозии и загрязненности почвогрунтов солевыми компонентами противогололедных реагентов ..... | 33 |
| <i>Шилевский С. Н., Доманская И. Н., Лукиш В. И., Кабашиникова Л. Ф.</i> Влияние $\beta$ -1,3-глюкана на защитные реакции растений томата при фузариозном увядании .....                    | 49 |

### РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Куликович Д. Б., Власова Н. Г., Висенберг Ю. В., Кузнецов Б. К.</i> Верификация метода реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения лиц, проживающих на радиоактивно загрязненной территории ..... | 59 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

|                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Назаренко Е. М., Морозова Н. А., Величко А. В., Колядич Ж. В., Нижегородова Д. Б.</i> Характеристика эффекторных механизмов цитотоксичности лимфоидных клеток у пациентов с синоназальными новообразованиями ..... | 69 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

|                                                                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Масехнович А. А., Гребенчикова И. А., Маркевич Р. М., Рымовская М. В.</i> Соотношение нитчатой и флокулирующей микробиоты активного ила для эффективной биологической очистки сточных вод ..... | 80  |
| <i>Голод Ю. В., Дубенок С. А.</i> Реализация задач Протокола по проблемам воды и здоровья согласно международным обязательствам Республики Беларусь.....                                           | 87  |
| <i>Цыбулько Н. Н., Журавков В. В., Цырибко В. Б., Алексейчик Е. В.</i> Загрязнение почв сельскохозяйственных земель стронцием-90: динамика и территориальное распространение .....                 | 100 |

## CONTENTS

### SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Shymanskaya O. Yu.</i> Educational potential of the academic discipline «Foreign language» in the context of sustainable development goals .....     | 4  |
| <i>Butkevich Yu. I.</i> Methodological foundations of the formation of environmental awareness in the practice of teaching linguistic disciplines ..... | 11 |

### THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

|                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Dobysh K. V., Kulikova E. Ya., Ermolenkova G. V.</i> Floristic diversity of grassland vegetation of the Dnepr river floodplain within the Republic of Belarus.....                   | 17 |
| <i>Shavaldada Ya. S., Komar A. Yu., Sudnik A. V., Batyan A. N.</i> Roadside phytocoenoses under conditions of erosion and soil pollution with salt components of deicing reagents ..... | 33 |
| <i>Shpileuski S. N., Domanskaya I. N., Loucsha V. I., Kabashnikova L. F.</i> B-1,3-glucan effect on the defence reaction of tomato leaves under fusarium wilt .....                     | 49 |

### RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

|                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Kulikov D. B., Vlasova N. G., Visenberg Yu. V., Kuznetsov B. K.</i> Verification of the method for reconstruction of individualized external exposure doses to persons living in a contaminated territory with radionuclides ..... | 59 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### MEDICAL ECOLOGY

|                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Nazaranka E. M., Marozava N. A., Vialichka A. V., Kolyadich J. V., Nizheharodava D. B.</i> Characteristics of lymphoid cell effector cytotoxicity mechanisms in patients with sinonasal neoplasms ..... | 69 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

|                                                                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Masekhnovich A. A., Grebenchikova I. A., Markevich R. M., Rymovskaya M. V.</i> The ratio of filamentous and flocculating microbiota of activated sludge for effective biological wastewater treatment..... | 80  |
| <i>Holad Yu. V., Dubianok S. A.</i> Implementation of the Protocol objectives on the issues of water and health according to international obligations of the Republic of Belarus.....                        | 87  |
| <i>Tsybulka M. M., Zhuravkov V. V., Tsyribko V. B., Alekseychik E. V.</i> Soil contamination of agricultural land with strontium-90: dynamics and spatial distribution.....                                   | 100 |

*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.  
№ 3. 2024**

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](http://www.iseu.bsu.by)

E-mail: [jecology@bsu.by](mailto: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 *М. Ю. Мошкова*

Подписано в печать 25.09.2023.  
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, 2024

**Journal  
of the Belarusian State University. Ecology.  
No. 3. 2024**

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](http://www.iseu.bsu.by)

E-mail: [jecology@bsu.by](mailto: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 *M. Yu. Moshkova*

Signed print 25.09.2023.  
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, 2024