



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

4

2021

МИНСК
БГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор	МАСКЕВИЧ С. А. – доктор физико-математических наук, профессор; директор Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. E-mail: direktor@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, Бетеста.
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.
Либератос Г.	Афинский технический университет, Афины, Греция.
Линге И. И.	Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия.
Лукашенко С. Н.	Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия.
Логинов В. Ф.	Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.
Медведев С. В.	ГНУ «Объединенный институт проблем информатики» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
Набиев И. Р.	Реймский университет, Франция, Реймс.
Степанов С. А.	Международный независимый эколого-политологический университет, Москва, Россия.
Стожаров А. Н.	Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь.
Тарутин И. Г.	ГУ «РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова», Минск, Беларусь.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief	MASKEVICH S. A. , doctor of science (physics and mathematics), professor; director of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: direktor@iseu.by
Deputy editor-in-chief	GERMENCHUK M. G. , PhD (engineering), docent; deputy director for research of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University, Minsk, Belarus. E-mail: germenchuk@iseu.by
Executive secretary	LOZINSKAYA O. V. , senior lecturer at the department of general biology and genetics of the International Sakharov Environmental Institute of the Belarusian State University. E-mail: aromia@rambler.ru

<i>Batyan A. N.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Golovaty S. E.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Golubev A. P.</i>	International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University, Minsk, Belarus.
<i>Grichik V. V.</i>	Belarusian State University, Minsk, Belarus
<i>Dardynskaya I. V.</i>	Great Lakes Center for Occupational and Environmental Safety and Health, Chicago, USA.
<i>Dziatkovskaya E. N.</i>	Institute of Education Development Strategy of the Russian Academy of Education, Moscow, Russia.
<i>Drozдовitch 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 378.016:530.1:504.75

ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ ИНЖЕНЕРА-ЭКОЛОГА И НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ ЗНАНИЯ ФИЗИКИ

Т. С. ЧИКОВА¹⁾, С. Е. ГОЛОВАТЫЙ¹⁾, С. А. МАСКЕВИЧ¹⁾

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

Проанализирована роль экологических рисков, решение которых определяет сохранение и прогресс цивилизации. Обоснован рост значимости профессии эколога в современном мире и необходимость расширения экологических специальностей. Дана характеристика профессиональных компетенций инженера-эколога. Отмечена роль физики в формировании знаний и умений, необходимых для успешной реализации профессиональных компетенций эколога. Рассмотрены основные законы и положения физики, знание которых обеспечивают эффективную подготовку специалистов экологического профиля в области природоохранной деятельности. Показано, что с учетом важности междисциплинарных знаний в понимании взаимосвязи природных и техногенных процессов, а также роли антропогенного

Образец цитирования:

Чикова ТС, Головатый СЕ, Маскевич СА. Профессиональные компетенции инженера-эколога и необходимые для их формирования знания физики. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;4:4–19. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-4-19>

For citation:

Chikova TS, Golovaty SE, Maskevich SA. Professional competences of environmental engineer and the knowledge of physics required for their formation. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;4:4–19. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-4-19>

Авторы:

Тамара Семеновна Чикова – доктор физико-математических наук, доцент; профессор кафедры общей и медицинской физики.

Сергей Ефимович Головатый – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; заведующий кафедрой экологического мониторинга и менеджмента.

Сергей Александрович Маскевич – доктор физико-математических наук, профессор; директор.

Authors:

Tamara S. Chikova, doctor of science (physics and mathematics), docent; professor at the department of general and medical physics.

chikova.tamara@iseu.by

Sergey E. Golovaty, doctor of science (agriculture), full professor; head of the department of environmental monitoring and management.

sscience@yandex.ru

Sergey A. Maskevich, doctor of science (physics and mathematics), full professor; director.

MaskevichSA@bsu.by

фактора в глобальных экологических проблемах, современная традиционная структура физического образования в системе профессиональной подготовки инженера-эколога в учреждении высшего образования требует совершенствования.

Ключевые слова: экология; антропогенный фактор; природоохранная деятельность; инженер-эколог; высшее образование; физика.

PROFESSIONAL COMPETENCES OF ENVIRONMENTAL ENGINEER AND THE KNOWLEDGE OF PHYSICS REQUIRED FOR THEIR FORMATION

T. S. CHIKOVA^a, S. E. GOLOVATYI^a, S. A. MASKEVICH^a

*^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daihabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: S. A. Maskevich (MaskevichSA@bsu.by)*

The role of environmental risks, the solution of which determines the preservation and progress of civilization, is analyzed. The article substantiates the growing importance of the ecologist profession in the modern world and the need to expand the range of environmental specialties. The characteristic of the professional competencies of an environmental engineer is given. The role of physics in the formation of knowledge and skills necessary for the successful implementation of professional competencies of an ecologist is noted. The basic laws and regulations of physics are considered, the knowledge of which provides effective training of environmental specialists in the field of environmental protection. It is shown that taking into account the importance of interdisciplinary knowledge in understanding the relationship between natural and man-made processes, as well as the role of the anthropogenic factor in global environmental problems, the modern traditional structure of physical education in the system of professional training of an environmental engineer in a higher educational institution requires improvement.

Keywords: ecology; anthropogenic factor; nature conservation activities; environmental engineer; higher education; physics.

Введение

Современная цивилизация развивается стремительно. Экономисты, философы и футурологи считают, что четвертая промышленная революция уже произошла [1]. В жизнь человека прочно вошли интернет, роботы, 3D-печать, беспилотные летательные аппараты, самоуправляемый и сверхскоростной транспорт, «умный» дом, бионические протезы, редактирование генома, суперматериалы и др. Однако достижения и инновации в различных областях технологий не только облегчают жизнь, но и резко обостряют старые техногенные проблемы, порождая новые. В перечне глобальных проблем современности, от решения которых зависит сохранение и прогресс цивилизации [2], вторая по значимости после проблемы новой мировой войны стоит экологическая проблема, обусловленная главным образом антропогенными факторами.

Системный анализ глобальных экологических проблем свидетельствует [3; 4], что около 50 % вклада в загрязнение окружающей среды вносят производство и потребление энергетических ресурсов (нефть, уголь, газ, электроэнергия). Связь между глобальными экологическими и энергетическими проблемами настолько очевидна, что в настоящее время современные средства коммуникации позволяют в онлайн режиме получать актуальную информацию по экологической статистике как в мире в целом, так и в отдельных странах и регионах. Они формируют рейтинги стран по уровню экологии, приводят информацию о непоправимом ущербе, наносимом загрязнением биосферы продуктами жизнедеятельности человека. По данным отчетов интернет-сайта статистических обзоров мировой энергетики BP¹, сайта Международного энергетического агентства IEA², сайтов экологической статистики³ и индекса загрязнения окружающей среды по странам⁴, сайта рейтинга городов по качеству воздуха (AQI) в реальном времени⁵ разрушительное

¹Statistical Review of World Energy 2021. 70th edition. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf> (дата обращения: 19.11.2021).

²Global Energy Review 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021> (дата обращения: 19.11.2021).

³Экологическая статистика. URL: <https://vawilon.ru/jekologicheskaja-statistika/> (дата обращения: 19.11.2021)

⁴Индекс загрязнения окружающей среды по странам в середине 2021 года. URL: https://www.numbeo.com/pollution/rankings_by_country.jsp (дата обращения: 19.11.2021).

⁵Рейтинга городов по качеству воздуха (AQI) в реальном времени. URL: <https://www.iqair.com/ru/world-most-polluted-countries> (дата обращения: 19.11.2021).

влияние антропогенной деятельности человека на природу привело к тому, что к настоящему времени произошла деградация более 15 % сухопутной части Земли, каждый час около 687 га продуктивных земель превращаются в пустыню, исчезают 5–6 представителей флоры и фауны. Для 250 млн человек стала проблемой нехватка качественной питьевой воды. Естественные водоемы ежегодно загрязняются около 500 млрд т нефти, бытовых и промышленных стоков. Ежегодный рост выбросов углекислого газа в атмосферу приводит к изменению климата, возникновению экстремальных погодных явлений, расширению зон обитания таких насекомых-переносчиков смертельных болезней, как москиты и клещи.

Статистические данные агентства ВР (рис. 1, 2) показывают устойчивый рост мирового потребления энергии и выбросов углекислого газа в последнее десятилетие (сокращение спроса на энергоносители и выбросов углекислого газа в 2020 г. связаны с мерами, принятыми для ограничения пандемии COVID-19).

Очевидно, что сохранение этой тенденции приведет к тому, что актуальность подготовки специалистов экологов со временем будет только возрастать.

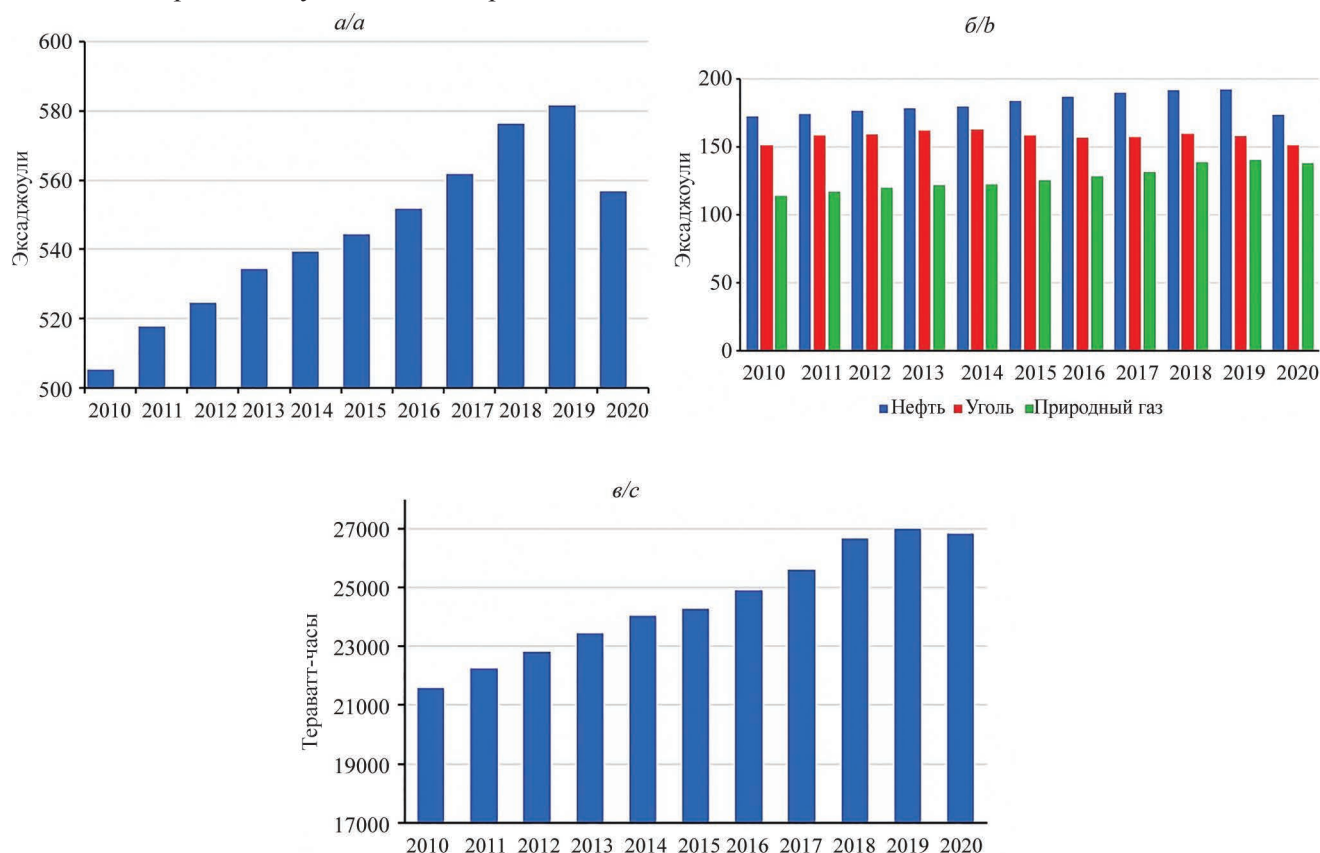


Рис. 1. Статистика мирового потребления энергии в целом (а), мирового потребления нефти, угля, природного газа (б), мирового производства электроэнергии (в)

Fig. 1. Statistics of world energy consumption in general (a), world consumption of oil, coal, natural gas (b), world electricity production (c)

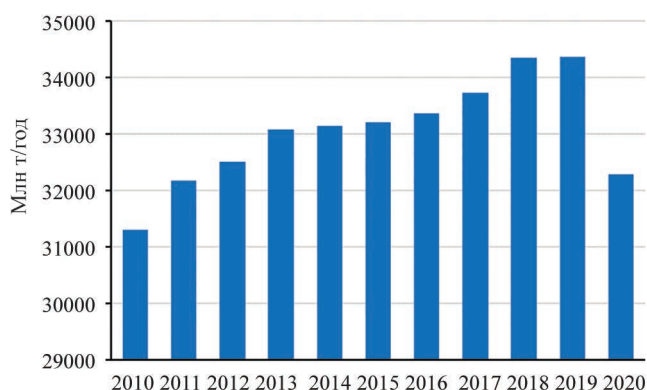


Рис. 2. Статистика мировых выбросов углекислого газа

Fig. 2. Statistics of world carbon dioxide emissions

Профессия эколога имеет широчайшие перспективы. Во-первых, антропогенные факторы, обусловленные различными формами негативного влияния деятельности человека на природу, диктуют необходимость создания на многих предприятиях отделов и управлений экологической безопасности. Во-вторых, возникают большие потребности в грамотных специалистах, способных разрабатывать и создавать экологически здоровую и комфортную среду обитания человека в условиях урбанизации и глобальных экологических рисков.

Рынок труда тонко реагирует на потребности времени: исчезают традиционные профессии и появляются новые. Эксперты в области рынка труда, прогнозирующие востребованность профессий на перспективу, утверждают, что эколог – профессия будущего и предсказывают появление таких новых профессий, связанных с экологией и техносферной безопасностью, как эоаудитор комплексной безопасности в промышленности, дистанционный координатор безопасности, специалист по преодолению системных экологических катастроф, эоаналитик в добывающих отраслях, эоаналитик в строительстве, парковый эколог, урбанист-эколог, эколог-логист, рециклинг-технолог, архитектор живых систем и др.

В нормативных документах, принятых в Республики Беларусь, большое внимание уделено экологической безопасности, как необходимому условию для устойчивого и сбалансированного развития страны (см. «Стратегия в области охраны окружающей среды Республики Беларусь на период до 2025 года»⁶). На государственном уровне право граждан на благоприятную окружающую среду и получение полной, достоверной и своевременной информации о ее состоянии гарантировано статьей 34 Конституции Республики Беларусь.

Экологическая безопасность реализуется в стране через систему мер и механизмов, обеспечивающих защищенность окружающей среды, жизни и здоровья граждан от вредного воздействия хозяйственной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Она включает нормативно-правовую базу и инфраструктуру экологической защиты, систему мониторинга окружающей среды, информирование и экологическое просвещение населения, научное экологическое обеспечение, подготовку квалифицированных кадров экологического профиля,

Профессиональные компетенции специалиста «Эколог. Инженер по охране окружающей среды»

Компетентностный подход в высшем образовании предполагает подготовку специалистов, обладающих знаниями, умениями и опытом, необходимыми для решения теоретических и практических задач в сфере своей профессиональной деятельности. Для специалистов экологического профиля, занятых в различных отраслях народного хозяйства и государственном управлении, такой подход подразумевает формирование и развитие практико-ориентированной компетентности, позволяющей ставить задачи, вырабатывать и принимать решения с учетом их социальных, экологических и экономических последствий. Требования к профессиональным компетенциям специалистов-экологов отражают как функциональные аспекты экологической деятельности в целом, так и специфические особенности, определяемые профессиональной сферой.

Образовательный стандарт I ступени высшего образования по специальности «Природоохранная деятельность», определяет требования к содержанию образования и уровню подготовки выпускников вуза. Он устанавливает, что освоение образовательных программ должно обеспечить формирование трех групп компетенций: универсальных, базовых профессиональных и специализированных компетенций.

Основные универсальные компетенции заключаются в том, что специалист должен владеть основами исследовательской деятельности, осуществлять поиск, анализ и синтез информации, решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе применения информационно-коммуникационных технологий; быть способным к саморазвитию и совершенствованию в профессиональной деятельности; проявлять инициативу и адаптироваться к изменениям в профессиональной деятельности; обладать гуманистическим мировоззрением, качествами гражданственности и патриотизма; обладать современной культурой мышления; уметь использовать основы философских знаний в профессиональной деятельности; выявлять факторы и механизмы исторического развития, определять общественное значение исторических событий; понимать основные категории политологии и идеологии, специфику формирования и функционирования политической системы и особенности идеологии белорусского государства; анализировать социально-значимые явления, события и процессы, использовать социологическую и экономическую информацию; проявлять предпринимательскую инициативу; использовать языковой материал в профессиональной области (в том числе на иностранном языке).

Специалист, получающий квалификацию «Эколог. Инженер по охране окружающей среды», в сфере производственной деятельности должен обладать следующими основными базовыми профессиональными компетенциями: применять теоретические и методологические положения физики и высшей математики для решения прикладных задач в сфере экологии и рационального природопользования; применять

⁶Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. URL: https://minpriroda.gov.by/ru/new_url_1670219329-ru/ (дата обращения: 19.11.2021).

основные фундаментальные знания и понятия общей, неорганической и органической химии, основные химические свойства и методы получения простых веществ, оценивать их влияние на окружающую среду и здоровье человека; применять технологические методы охраны окружающей среды в своей профессиональной деятельности; использовать основные принципы и методы технологий основных производств в области охраны окружающей среды и рационального природопользования; применять основные процессы и оборудование в области охраны атмосферного воздуха и гидросферы от загрязняющих веществ; анализировать основные свойства, закономерности функционирования, динамики и эволюции биосферы, главные функции биоты в биосфере, ее экологическое значение и особенности хозяйственного использования; анализировать особенности процессов почвообразования в различных природных условиях, типологии почв и закономерности территориального размещения типов почв, проводить оценку экологического состояния почв и определять их основные агрохимические свойства; использовать методические подходы при оценке планируемой хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду; применять нормы законодательства и технические нормативные правовые акты в области охраны окружающей среды; применять экологические требования к проектированию объектов санкционированного размещения промышленных и твердых коммунальных отходов, использовать основные методы и способы переработки различных видов отходов, применять методологические подходы к извлечению вторичных материальных ресурсов и пути снижения образования отходов; использовать данные системы мониторинга окружающей среды и природно-ресурсных кадастров для оценки экологического состояния компонентов окружающей среды; применять основные методы государственного управления охраной окружающей среды и рациональным природопользованием в своей профессиональной деятельности; использовать современные энергосберегающие технологии и типовые энергосберегающие мероприятия в своей профессиональной деятельности; анализировать источники информации, выделять наиболее существенные факты, давать им собственную оценку и интерпретацию, использовать на практике понятийно-категориальный аппарат, принятый в среде специалистов в области природоохранной деятельности, в том числе на иностранном языке; применять научные подходы, концепции и методы, выработанные в рамках современных социальных, экономических и естественных наук для самостоятельного анализа теоретических проблем, оценки состояния окружающей среды и факторов антропогенного воздействия на нее; применять основные методы защиты населения от негативных факторов антропогенного, техногенного, естественного происхождения, принципы рационального природопользования и энергосбережения, обеспечивать здоровые и безопасные условия труда.

Важными для инженера-эколога являются специальные компетенции, обеспечивающие комплекс требуемых характеристик специалиста и направленные на получение основополагающих знаний по специальности, специальных и междисциплинарных знаний, позволяющих осуществлять производственную деятельность инженера-эколога.

Совокупность универсальных, базовых профессиональных и специализированных компетенций должна обеспечивать специалисту способность осуществлять не менее, чем один вид профессиональной деятельности, решая при этом не менее одного типа задач профессиональной деятельности.

Очевидно, что инженер-эколог, обладающий прочными базовыми научно-теоретическими знаниями, приемами использования технических устройств, владеющий исследовательскими навыками, сможет реализовывать междисциплинарный подход при решении экологических проблем и порождать новые идеи. Он будет способен адаптироваться к быстро изменяющимся условиям труда, требующих повышения квалификации в течение всей жизни.

Вопросы физики при подготовке специалиста в области экологии

Классический термин «экология», введенный в 1866 г. Э. Геккелем для обозначения биологической науки, изучающей взаимодействие живых организмов, их сообществ между собой и с окружающей средой, в настоящее время приобрело новое толкование: его главным содержанием стало представление об уровне техногенного загрязнения окружающей среды. Причины современных экологических проблем часто выходят далеко за рамки традиционной экологии и их решение требует системного анализа, основанного на знаниях из различных областей физики, химии и биологии о взаимоотношении человека и природы в целом. При таком подходе экология рассматривается как проблемно-ориентированная комплексная наука, занимающаяся изучением процессов антропогенного воздействия на окружающую среду и разработкой методов уменьшения этого воздействия, как важнейшей и смыслообразующей составляющей взаимодействия человека и окружающей среды.

Очевидно, что в основе многих технологий и отраслей, являющихся основными источниками загрязнения окружающей среды, лежат такие достижения физики, как, например, физические поля, энергетика, атомная промышленность и др. С другой стороны, физика не только создает, но и решает экологические проблемы. Она предлагает и разрабатывает физико-математические модели природных и техногенных

процессов для исследования влияния антропогенных воздействий на функционирование экосистем. На основе широкого спектра физических методов изучения строения и свойств вещества разрабатываются эффективные средства мониторинга экосистем различного уровня. В развитии экологии как науки, интегрирующей совокупность знаний о биосфере и антропогенных факторах, важная роль принадлежит физике.

Для того чтобы специалист-эколог, получивший образование в современном высшем учебном заведении, долго оставался востребованным в своей профессиональной сфере в условиях ускорения научно-технологического прогресса и возрастающего масштаба воздействия человека на природу, он должен обладать прочными фундаментальными знаниями физики, а также глубоко понимать ее место, роль законов и принципов в различных экологических процессах. Традиционное преподавание курса физики в высшем учебном заведении предполагает подробное изложение основных физических принципов и законов в следующей последовательности: механика, молекулярная физика и термодинамика, электричество и магнетизм, оптика, атомная и ядерная физика. На ряде примеров проанализируем, как положения, принципы и законы физики объясняют возможные экологические риски и указывают на пути их предотвращения. При этом нужно учитывать, что физическое объяснение многих явлений и процессов природы и техники требует привлечения ряда понятий и законов физики из различных разделов дисциплины. Итак, для формирования цельного научного представления о таких явлениях и процессах их изучают с разносторонних позиций и в различных разделах.

Механика. Физические методы мониторинга окружающей среды, работа ряда приборов и оборудования, используемых для очистки воздуха и воды, основаны на законах кинематики и динамики вращательного движения [5; 6]. Например, приборы, предназначенные для измерения скорости движения воздушных потоков (анемометры) построены на принципах преобразования энергии поступательного движения воздуха в механическое вращение. В основу работы инерционных газовых фильтров, центрифуг и ультрацентрифуг для очищения воды от песка, глины, органических веществ и разделения многокомпонентных руд на фракции с разными характеристиками положены процессы седиментации и сепарации, обусловленные силами гравитации и центробежными силами инерции.

Многие механические процессы, протекающие в биосфере обусловлены силой тяжести и ускорением свободного падения – важнейшими физическими факторами среды обитания на Земле. Гравитация обеспечивает выпадение вредных частиц пыли и дыма из атмосферы на Землю, вызывающее пагубные экологические последствия [7]. Однако этот же физический принцип используется в борьбе с загрязнением воды: под действием силы тяжести происходит оседание примесей на дно отстойников.

Использование закона сохранения импульса для построения реактивного двигателя обеспечило технологический прорыв, открывший человеку дорогу в космос. В то же время освоение космоса привело к появлению больших экологических рисков. Физические процессы, сопровождающие работу реактивного двигателя, – это оседание на землю экологически агрессивных частиц при выбросе газов, нагревание и шум сильно загрязняют окружающую среду. С другой стороны, космические аппараты играют большую роль в контроле за состоянием атмосферы, позволяют своевременно обнаруживать опасные явления природы: ураганы, пожары, извержения вулканов и др. [8]. Искусственные спутники Земли используются для изучения глобального влияния производственной деятельности людей на природу нашей планеты.

Физические понятия «работа», «мощность» и «механическая энергия» используются при анализе многих экологических задач и разработке методов их решения (коэффициент полезного действия и экологическая безопасность различных механизмов, способы увеличения полезной работы, рациональное использование энергии рек, ветроэнергетики и др.). Они взяты за основу объяснения таких экологических проблем, как понижение уровня грунтовых вод при добыче полезных ископаемых открытым способом, негативное влияние орошения и осушения на микроклимат, нарушение экологического равновесия при строительстве каналов, шлюзов и водопроводов лежит закон сообщающихся сосудов гидростатики [9]. Архимедова сила и условия плавания тел обеспечивают сплав древесины по рекам и судоходство, однако порождают следующие экологические проблемы: разрушение берегов, загрязнение водоемов и перенос загрязнения водными путями, пагубное влияние на рыболовство, образование нефтяной пленки на поверхности воды, аварии судов, перевозящих химически опасные грузы [10].

Количество людей, страдающих вирусными и бактериальными заболеваниями, а также различными формами аллергий, вызванными патогенными взвесями в воздухе, растет в мире с каждым годом. Наука, изучающая перенос биологических аэрозолей в пространстве, называется аэриобиологией и основывается на физических законах аэродинамики [11]. Кроме того, законы аэродинамики объясняют роль аэрозольных загрязнений в атмосферном воздухе как центров конденсации, влияющих на процессы образования облаков [12]. Механические колебания и волны, особенно акустического диапазона, также вносят значительный вклад в физическое загрязнение окружающей среды [13]. Характер и степень воздействия звуковых волн на живые организмы зависит от их частоты и интенсивности [14]. Беспорядочные звуковые колебания сложного спектра образуют шум. При превышении допустимого для человека уровня

в 80 дБ происходит шумовое загрязнение [15]. Как утверждают медики, длительное шумовое воздействие, выходящее за пределы указанного диапазона, оказывает на здоровье человека более сильное негативное действие, чем газохимическое, промышленное и транспортное. Оно сравнимо с действием повышенной радиации [16].

К опасным для живых организмов относятся и такие воздействия, как вибрация и инфразвук [17]. Вибрация – механические колебания с большой частотой и малой амплитудой – приводит к нарушениям сердечно-сосудистой и центральной нервной систем, дегенеративным изменениям костных тканей, повреждениям слуха. Инфразвук (упругие волны с частотами меньшими, чем область частот, воспринимаемых человеком) может вызвать у человека нарушение биоритмов, головные боли, беспокойство. Инфразвук с частотой 7 Гц смертелен для человека и его действие приравнивают к психотропному оружию. Ультразвук – звуковые волны, имеющие частоту выше воспринимаемых человеческим ухом, то есть выше 20 000 Гц, с успехом применяемый в диагностике и лечении заболеваний, при продолжительном и интенсивном воздействии также может стать поражающим фактором.

Молекулярная физика и термодинамика. Роль этого раздела физики в понимании и решении экологических проблем особенно значима, поскольку биосфера – это область существования живых организмов на Земле, которая постоянно обменивается веществом, энергией и информацией с земными недрами, верхними слоями атмосферы и космосом [18–22]. С физической точки зрения она является сложной нелинейной многоуровневой открытой термодинамической системой. Специалист-эколог должен знать допустимые нормы изменения термодинамических параметров экосистемы (температура, объем, атмосферное давление, теплоемкость, влажность), обеспечивающих ее нормальное функционирование.

От состава и физических параметров атмосферы зависит существование жизни на Земле и экологическая безопасность всех организмов. Под действием антропогенных факторов происходит загрязнение атмосферы, изменяется ее состав и термодинамические параметры, нарушается экологическое равновесие [23]. Распространение вредных веществ в атмосфере происходит путем физических процессов диффузии, конвекции и турбулентного перемешивания [24].

Загрязняющие атмосферу вещества по агрегатному состоянию можно разделить на три вида: твердые, жидкие (пары) и газообразные. Экологические последствия их действия различны: рассеивание продуктов сгорания топлива в верхних слоях атмосферы в результате авиapolетов на больших высотах [25], запуска ракет и спутников, а также выброс фреонов в воздух приводят к уменьшению озонового слоя [26]. Попадающий в атмосферу диоксид серы в результате химических реакций образует аэрозоли из сернистой и серной кислот, которые в результате конденсации водяного пара становятся причиной выпадения кислотных дождей. Изменение прозрачности атмосферы для излучения Солнца в оптическом диапазоне из-за скопления в ней парниковых газов способствует повышению такого важнейшего физического параметра биосферы, как температура ее нижних слоев, что сопровождается изменением климата Земли. Атмосферная диффузия вредных примесей в воздухе от промышленных центров является причиной образования смога в мегаполисах [27]. Диффузионный солевой обмен между атмосферой и океаном – причина коррозионной агрессивности атмосферы в прибрежных районах.

Еще один важный физический параметр среды обитания, оказывающий определяющее влияние на биологические системы – влажность воздуха. Комфортная для человека влажность составляет 30–60 % и ее повышение или понижение вследствие изменения состава воздуха отрицательно влияет на организм [28]. Высокая влажность при температурах ниже –30 °С является физической причиной такой экологической проблемы, как «ледяной смог», возникающий в городах, расположенных в северных широтах и состоящий в том, что в воздухе образуются небольшие кристаллики льда, к которым прикрепляются имеющиеся в атмосфере частицы вредных веществ, образуя густой туман, который нарушает дыхание и кровообращение человека.

Физические термодинамические законы объясняют такие экологические состояния, явления и процессы, как тепловой баланс Земли и причины его возможного нарушения [29]; влияние изменения температуры и давления на сбалансированность обмена веществ и энергии в природе; засоление почвы и влияние засоленности воды на температуру льдообразования; загрязнение поверхности водоемов, обусловленное поверхностным натяжением и смачиванием, приводящие к уменьшению испарения воды и выпадения осадков; явление смачивания как одного из факторов в самоочищении водоемов от примесей; питание растений за счет капиллярных явлений в почве; неспособность почвы, лишенной растительности, поглощать дождевую воду, приводящее к нарушению ее водного баланса [30]; диффузионный газообмен между почвой и воздухом, диффузионный перенос питательных веществ из почвы к корневой системе растений и др. [31–33].

Особое место в термодинамике занимают экологические проблемы теплоэнергетики, теплопередачи, автомобильного транспорта, повышения коэффициента полезного действия тепловых машин. Сжигание традиционного органического топлива (уголь, нефть, газ) – основной фактор загрязнения биосферы [34]. Из-за огромных выбросов в атмосферу токсичных веществ и тепла при работе тепловых электростанций природе наносится невосполнимый ущерб [35]. Остро встала проблема «парникового эффекта» [36; 37],

возникающего из-за выбросов углекислого газа при сжигании органического топлива, вызывающего глобальное потепление климата на планете [38]. Проблема увеличения углекислого газа в атмосфере из-за промышленных и транспортных выбросов в настоящее время стала одной из самых актуальных научных проблем [39]. Например, работа D. W. Keith, et al. [40], посвященная улавливанию углекислого газа из атмосферы, входит в число пяти самых цитируемых работ мира.

Переход от тепловых электростанций к атомным уменьшает химическое, но одновременно увеличивает тепловое загрязнение, которое меняет температурный режим воздушной и водной окружающей среды, а также нарушает динамику происходящих там экологических процессов [41]. При ресурсосбережении и уменьшении антропогенного воздействия на биосферу очевидна необходимость освоения возобновляемых и нетрадиционных источников энергии, замена на транспорте тепловых двигателей электрическими [42].

Термодинамика биосферы Земли обусловлена поступлением энергии высокочастотного излучения от Солнца и рассеиванием ее в космос в форме теплового излучения. Согласно закону Больцмана, в результате этого процесса энтропия в системе «Солнце–Земля» возрастает, то есть материя в изолированной системе стремится к хаотическому состоянию [43]. В то же время, благодаря солнечной энергии на Земле, происходят обратные энтропийные процессы – процессы самоорганизации. В результате фотосинтеза солнечная энергия преобразуется в высокоорганизованную материю, что приводит к повышению степени порядка в системе. Для таких процессов ввели новый термин – негэнтропия как мера стремления к упорядоченности. Негэнтропию принято рассматривать как отрицательную энтропию [44]. Вмешательство человека в деятельность экосистемы приводит к увеличению ее неупорядоченности, то есть к снижению негэнтропии. Соблюдение отрицательного энтропийного баланса Земли является залогом устойчивого развития нашей экосистемы [45].

Электричество и магнетизм. Вся биосфера и пространство за ее пределами заполнены электрическими и магнитными полями космического, техногенного и биогенного происхождения [46]. Кроме того, наша планета Земля – это большой магнит со своим магнитным полем, в котором протекают все экологические процессы [47]. Естественные электромагнитные излучения (магнитное поле Земли, радиоизлучение Солнца, атмосферное электричество) для экосферы и человека не опасны. Многие биологические процессы в природе происходят при обязательном наличии электромагнитных полей.

Любое техническое устройство, которое вырабатывает или использует электрическую энергию, является источником электромагнитного излучения. Электромагнитные поля, создаваемые искусственными источниками, характеризуются различными физическими параметрами: частотой или длиной волны, интенсивностью, когерентностью, поляризацией волны. По диапазону частот и сфере применения их можно разделить на три группы: низкочастотные электромагнитные поля, широко применяемые в промышленности; высокочастотные, обеспечивающие работу телевидения, радиовещания, радиосвязи, медицинской техники; электромагнитные поля сверхвысоких частот, используемые в медицине, радиолокации, навигации, сотовой связи. В зависимости от видов и интенсивностей электромагнитных полей их позитивные и негативные воздействия на человека и природу многообразны [48]. Кроме того, характер и механизм воздействия электромагнитного излучения на живые клетки и организмы определяются диэлектрической проницаемостью, электрической проводимостью, магнитной проницаемостью, глубиной проникновения и коэффициентом отражения облучаемого объекта. На различные виды живых организмов одни и те же электромагнитные излучения влияют по-разному [49].

Сложные электромагнитные поля с разными частотами и интенсивностями, создаваемые одновременно несколькими источниками, расположенными в разных местах, при постоянном облучении выше установленных норм приводят к электромагнитному загрязнению, вызывающему изменение электромагнитных свойств среды обитания и негативные воздействия на здоровье людей и природу, к дисбалансу видов живых организмов и нарушению устойчивости экосистемы. Одним из его разновидностей является электросмог, характерный для густонаселенных мегаполисов, насыщенных техническим электрооборудованием, бытовыми электроприборами и разнообразными гаджетами, представляющий собой экологически вредные излучения с низкими и сверхнизкими частотами, одновременно создаваемыми несколькими источниками, производящими, передающими или использующими электромагнитную энергию. По эффективности и силе отрицательного воздействия на биосферу электромагнитное загрязнение окружающей среды в крупных городах на сегодняшний день приближается к загрязнению химическими веществами [50].

Характер и механизм воздействия электромагнитного излучения на физико-химические, биологические процессы и экологию в целом до конца не изучен. По мере роста потребностей в энергии острота экологической проблемы, обусловленной электромагнитным загрязнением окружающей среды, будет только нарастать и в ее решении важная роль принадлежит физикам и инженерам-экологам.

Одна из главных техногенных экологических проблем состоит в растущем загрязнении атмосферы продуктами сгорания топлива, используемого для получения электроэнергии. В настоящее время производство около 90 % электрической энергии осуществляется за счет трех видов энергоресурсов: органического топлива, воды и атомного ядра. Традиционная энергетика обеспечивает производство электроэнергии на

тепловых электростанциях (ТЭС), гидроэлектростанциях (ГЭС) и атомных электростанциях (АЭС). Каждый из этих способов получения электричества по-своему является источником загрязнения биосферы [51].

При работе ТЭС образуется огромное количество твердых отходов в виде золы и шлаков с токсичными химическими элементами, которые проникают в почву и подземные воды, выводя их из природопользования. Ее атмосферные выбросы содержат углекислый газ, тяжелые металлы и другие токсичные вещества различного характера действия; процесс горения на тепловой электростанции приводит к кислородному голоданию и изменению природного теплового баланса в регионе, прилегающем к станции. Вблизи ТЭС, работающих на угле, всегда превышен естественный радиационный фон; при сбросе отработанной воды происходит тепловое загрязнение природных водоемов; работа ТЭС способствует шумовому и электромагнитному загрязнению окружающей среды. Химическое загрязнение окружающей среды при сжигании топлива на ней является одной из доминирующих причин парникового эффекта и кислотных дождей.

Влияние ГЭС менее разрушительно для экосферы, однако при ее работе происходит шумовое и электромагнитное загрязнение; нарушаются естественные пути миграции рыб; создаются проблемы для водоснабжения, орошения и судоходства.

На АЭС тепловая энергия, получаемая при делении ядер радиоактивных изотопов урана, превращается сначала в механическую, а затем – в электрическую. Основная опасность атомной электростанции состоит в загрязнении окружающей среды радиоактивными отходами; тепловом загрязнении водоемов водой, используемой в производственном цикле; в опасности радиоактивного загрязнения среды при авариях и захоронении радиоактивных отходов [52].

Еще один электрический процесс, который создает опасные загрязнения окружающей среды – это электролиз. Он широко применяется в металлургии для извлечения и переработки металлов из руд и получения химически чистых металлов, является основой гальванического производства и обеспечивает работу химических источников тока. Гальваническое производство относится к наиболее опасным источникам загрязнения окружающей среды [53], агрессивность воздействия, масштабы и пагубность последствий которого превосходят разливы нефти и радиацию. Его основные загрязняющие факторы – это высокая концентрация вредных жидких, газообразных и пылевых аэрозолей в рабочих зонах цехов, большие объемы сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов и огромные количества твердых отходов, образующихся при реагентном обезвреживании отходов производства. Объединяясь в одних потоках, они оказывают совместное комбинированное действие на экосистему «вода–почва–растение–животный мир–человек».

Привычные в повседневной жизни батарейки также являются источником многих опасностей [54]. Входящие в их состав химические вещества (магний, ртуть, олово, свинец, никель, цинк, кадмий), попадая в организм человека и накапливаясь в нем, могут вызывать тяжелые заболевания; батарейки могут взрываться и наносить увечья и ожоги; при сжигании они выделяют отравляющие газы диоксины; при их захоронении на свалке вредные вещества в процессе разложения наносят огромный вред экологии. Мировые потребности в химических источниках электрического тока, а соответственно, их производство неуклонно растут, в результате чего проблема утилизации отработанных источников питания становится уже глобальной экологической проблемой.

Кажутся вполне безобидными такие физические явления, как электризация тел и статическое электричество. Однако в больших масштабах они создают проблемы на производстве, транспорте и плохо влияют на здоровье человека [55]. Статическое электричество возникает в результате контакта между материалами (трение, намотка-размотка, резание и др.); быстрого перепада температур; действия радиации, ультрафиолетового или рентгеновского излучения, сильных электрических полей, электромагнитной индукции. На производстве и транспорте при наличии пожаро- и взрывоопасных смесей, пыли и паров легковоспламеняющихся жидкостей искровой разряд статического электричества может вызвать пожар или взрыв. Физические методы защиты от статического электричества основываются либо на уменьшении интенсивности возникновения статических электрических зарядов, либо на устранении уже образовавшихся зарядов.

Электричество и магнетизм, с одной стороны, создают экологические проблемы, с другой – помогают устранять экологические риски, например, в области очистки воздуха и воды [56; 57]. Принцип действия электростатических очистителей воздуха основан на действии сил притяжения между частицами в воздухе и пластинами пылесборника, имеющими электрические заряды противоположной полярности. Для очистки воздуха используется также наносекундный стримерный разряд в камере с обрабатываемым газом, в результате чего образуются химически активные частицы, которые, взаимодействуя с вредными органическими примесями, либо сжигаются, либо превращаются в безопасные или легко улавливаемые соединения.

Очистка и обеззараживание сточных вод проводится с применением процессов электрокоагуляции, электроокисления, электрофлотации, а также с помощью электролиза или путем воздействия на воду постоянным магнитным полем, в результате чего растворенные в ней ионы кальция, кремния и магния теряют свою способность к солеобразованию (накипи). В основе технологии очистки жидкостей

с помощью магнитных наночастиц лежит принцип добавления в сточные воды магнитной жидкости, капельки которой, растворяясь в загрязнениях, делают их слабомагнитными. В магнитных сепараторах в области неоднородного магнитного поля происходит разделение загрязненных магнитных капель и немагнитной жидкости. Так, например, очищают воду, загрязненную нефтепродуктами.

Оптика. Раздел физики, который посвящен выяснению природы электромагнитного излучения, его распространению в различных средах и взаимодействию с веществом [58]. Свет как источник энергии для фотосинтеза является одним из основных факторов существования жизни на Земле. С другой стороны, прямое воздействие солнечного света на плазму живого организма смертельно опасно. При нормальных условиях биосфера сама регулирует оптимальное использование полезных составляющих света, а также обеспечивает ослабление вредных составляющих и защиту от них.

С точки зрения волновой оптики солнечное излучение – это спектр электромагнитных волн с разными длинами волн. Оно состоит из видимой области спектра (около 50 %), инфракрасных лучей (около 50 %), их часто называют тепловыми и ультрафиолетовых излучений (1 %), обладающих фотохимическим действием. Каждый спектральный диапазон солнечного излучения играет свою роль в экологическом благополучии Земли и любые отклонения от нормы приводят к дисбалансу в биосфере.

Изменение прозрачности атмосферы, степени ее однородности, величины фонового свечения, суточные перепады температур и сила ветра под действием антропогенного фактора приводят к световому загрязнению окружающей среды [59].

Источниками экологических угроз могут служить различные оптические явления и процессы [60], в частности, световой смог – ночное рассеивание света искусственных источников освещения в нижних слоях атмосферы. Он приводит к нарушению биоритмов растений и животных; изменяет поляризацию лунного света, используемую многими животными для навигации; препятствует нормальному ночному уменьшению атмосферного смога, создаваемого газами, выделяемыми днем автомобилями и производствами. Световое загрязнение затрудняет астрономические наблюдения из-за уменьшения контраста между небом и небесными светилами. А в сочетании с физическим загрязнением атмосферы вблизи больших сильно освещенных городов многие небесные объекты становятся вообще невидимыми. Загрязнения атмосферы приводит к изменению спектральной плотности потока и интенсивности солнечного излучения, что негативно влияет на процесс фотосинтеза.

Другая важная функция света состоит в том, что с помощью светового потока человек воспринимает окружающий мир и познает его. Практическое применение света в нашей жизни многогранно. Оптические приборы позволяют проникнуть в микромир и космос. Характеристики поглощаемого, отражаемого, рассеиваемого и испускаемого веществом света содержат уникальную информацию о строении вещества в целом, а также о его структуре на атомном и молекулярном уровне. Световой луч может резать тоньше скальпеля органические ткани в медицине и массивные листы металла в промышленности. С помощью света управляют химическими реакциями, передают информацию и др.

Законы взаимодействия оптического излучения с веществом и методы оптических наблюдений лежат в основе оптического экологического мониторинга [61; 62]. К ним относятся спектрометрические методы, основанные на фотометрии естественных и искусственных источников оптического излучения, методы лазерной спектрофотометрии, фурье-спектроскопии, методы спектральной прозрачности атмосферы. Особое значение имеют радиометрические методы, основанные на фотометрии потоков оптического излучения от природных источников. Методы ультрафиолетовой радиометрии и инфракрасной радиометрии связаны с измерениями в диапазонах, имеющих особую экологическую значимость. Метод поляризационной радиометрии применяется при исследовании поляризационных характеристик регистрируемого оптического излучения. Особенности угловой зависимости рассеяния падающего излучения отдельными частицами, например, аэрозолями или молекулами, используются в нефелометрическом методе. Неупругое рассеяние оптического излучения на молекулах атмосферы за счет эффекта Рамана реализуется в методе комбинационного рассеяния. Широко используемый метод дистанционного газоанализа основан на дифференциальном поглощении и рассеянии излучения.

Атомная и ядерная физика. Двадцатый век ознаменовался квантово-релятивистской революцией в физике. Обнаружение и изучение электрического тока в растворах (электролиз) и газах, рентгеновского излучения, явлений радиоактивности (α -, β -, γ -излучений), волновых свойств электронов и открытие нейтрона не только указали на сложную структуру вещества на уровне атомов и атомных ядер, но и привели к созданию квантовой механики как новой теории микромира. Тем самым были разработаны теоретические основы для понимания строения материи. Появились новые идеи, а затем и новые возможности для создания инструментов экспериментального исследования микромира. Без знаний физических основ строения электронных оболочек атомов и молекул невозможно понять химических свойств веществ окружающего нас мира и их взаимодействий с электромагнитным излучением, природу устойчивости и многообразия веществ (в том числе биологических объектов).

Разработка теории цепной ядерной реакции, высвобождающей колоссальную энергию, положили начало современной науке об атомной энергии. Ядерные реакции и ионизирующее излучение составили основу ядерных технологий. Энергия, заключенная внутри ядра атома, на сегодняшний день считается экологически самой чистой. Ядерная энергетика не потребляет кислорода и при нормальной эксплуатации имеет ничтожное количество выбросов. Ученые считают, что если ядерная энергетика полностью заменит традиционную энергетiku, то возможность глобального потепления будет устранена. Тем самым были разработаны теоретические основы для понимания того, как устроено и за счет каких сил и каких взаимодействий обеспечивается все многообразие веществ (в том числе биологических объектов) в природе. Появились новые идеи, а затем и новые возможности для создания инструментов экспериментального исследования микромира.

Излучение энергии ядрами атомов в виде частиц или электромагнитных волн, то есть радиация, влияющая на живые организмы, на Земле существовала всегда. Источники природного радиационного фона – это космическое излучение, природные радиоактивные вещества, радиоактивность оболочек Земли, радиоактивность горных пород, почв, природных вод и атмосферного воздуха [63]. Радиация влияет на климат на планете [64]. По мере освоения ядерных технологий и использования в хозяйственной деятельности источников радиоактивных излучений сформировался антропогенный радиационный фон [65]. Его образуют производство и использование искусственных радионуклидов и других источников ионизирующих излучений в науке, медицине и промышленности; добыча и переработка радиоактивного минерального и углеводородного сырья, атомная энергетика, ядерные реакторы исследовательского типа, полигоны для испытания ядерного оружия, ядерные взрывы в мирных целях, военные ядерные и термоядерные взрывы. Ядерные энергетические установки используются на атомных ледоколах и атомных подводных лодках. Радиоизотопные методы внедряются в ветеринарии, в птицеводстве и животноводстве. В здравоохранении возникло новое научное и практическое направление – ядерная медицина, в которой для диагностики и лечения заболеваний используются радионуклиды. Ядерная медицина потребляет свыше половины всех имеющихся в мире радиоактивных изотопов.

«Атом» широко проникает в жизнь человека со всем многообразием новых возможностей для изучения живых систем и диагностики их функционального состояния и, одновременно, с новыми рисками [66]. Свойства атомов или молекул взаимодействовать с излучением широкого диапазона энергий используется для экологического мониторинга окружающей среды, основанного на применении нейтронноактивационного, рентгеноспектрального, атомно-абсорбционного методов и атомно-эмиссионного анализа [67]. Без использования рентгеновского излучения, например, немыслима современная медицинская диагностика [68].

Наиболее опасными для создания серьезных экологических рисков, связанных с радиационным заражением, являются предприятия ядерного топливного цикла и военные объекты ядерных испытаний. Даже при самом тщательном соблюдении правил техники безопасности каждый реактор выбрасывает ряд радионуклидов, одни из которых распадаются быстро, другие – живут достаточно долго и даже остаются в биосфере практически бесконечно, распространяясь по всему земному шару. При нормальной работе ядерного реактора население, проживающее вблизи АЭС, получает дозы облучения, не превышающие нескольких процентов естественного радиационного фона, которые не влияют на здоровье. Однако при авариях радиационный фон может быть многократно превышен.

Атомные бомбардировки Хиросимы и Нагасаки [69] и тяжкие последствия ряда аварий на АЭС и радиационно опасных объектах в мире показали глобальную значимость экологической проблемы радиоактивного заражения биосферы, которое может представлять угрозу самому существованию человечества на Земле.

Заключение

По мнению ученых, глобальная экосистема Земли представляет собой сложный комплекс взаимосвязей между сушей, водной средой, воздухом, биосферой и техносферой [70]. В частности, климатическая система состоит из четырех подсистем: атмосферы, гидросферы, криосферы и биосферы, получающих электромагнитное излучение Солнца. Такие системы имеют множество степеней свободы и характеризуются нелинейной динамикой эволюции. Для их понимания, изучения и оценки необходимо знать основы физики и других дисциплин, связанных с экологией (химия, биология и инженерия).

Анализ содержания профессиональной подготовки инженеров-экологов в странах Европы и в англоязычных странах – США, Великобритания и Австралия [71–74] показывает, что в мире не существует единой модели проектирования содержания учебных курсов физики университетского уровня для таких специальностей. Общим для всех подходов является наполнение содержания курса физики с учетом специализации инженерно-экологического образования и требований к профессиональным компетенциям выпускников учреждения высшего образования. В большинстве англоязычных университетских образовательных программах для экологов изучение физики осуществляется в рамках дисциплины «Физика окружающей среды» (Environmental physics), которая с физической точки зрения объединяет

процессы, происходящие в атмосфере, гидросфере (океаны), литосфере (суша) и биосфере (почва и растительность). Современная физика окружающей среды трактуется как наука о взаимодействии между организмами и окружающей средой с позиции физики экологических процессов и проблем. Ее основные принципы базируются на законах обмена излучением, теплом, массой и импульсом между организмами и окружающей их средой [75–77]. Издано много англоязычных учебников различных авторов, в которых содержание курса физики окружающей среды раскрывается с учетом поставленных дидактических задач и специализации обучающихся [78–81]. Углубление специализации инженеров-экологов осуществляется посредством модульности обучения, предполагающего представление информации в виде коротких курсов: физика и динамика атмосферы [82; 83], физика переноса массы и тепловой энергии [84; 85], физика Солнца, трансформации солнечной радиации и радиационный баланс [86; 87], основы геофизики [88], физика недр Земли [89], физика облаков и осадков [90], фазовые изменения в круговороте воды [91], физика почв и растворенных в них веществ [92], физика источников энергии [93], физика климата [94] и др., которые, с одной стороны, являются самодостаточными, с другой – связаны с другими модулями.

Из анализа учебных планов специальностей экологического инженерного профиля в нашей стране следует, что изучение физики в них носит, как правило, академический характер, без углубленной привязки к профилю обучающихся. Знание законов физики формирует научную базу понимания природных и техногенных процессов и является основой для изучения ряда последующих специальных технических дисциплин.

Исходя из тенденции интернационализации в сфере высшего образования, повышения академической мобильности и потребности в расширении возможностей экспорта образовательных услуг при совершенствовании подготовки инженеров-экологов, целесообразно учитывать лучшие мировые практики реализации профессиональных образовательных программ. Курс физики для экологов должен формировать понимание биосферы и человека в ней как целостной динамической системы, раскрывать иерархию уровней организации материи и физических полей и их влияние на экологию человека. Особое место должно быть отведено решению экологических задач методами физической науки в области энергетики на основе возобновляемых и нетрадиционных источников энергии. Кроме того, инженер-эколог должен получить физические знания, необходимые при использовании и создании приборов и устройств для экологического мониторинга, разработке природоохранных методов и средств защиты, а также для проведения экологического просвещения среди населения. Профессиональная направленность в преподавании физики инженерам-экологам способствует формированию на начальной стадии обучения понимания важности получаемых знаний для профессионального становления, усиливает мотивацию к обучению, повышает творческую активность студентов и качество подготовки специалистов.

Библиографические ссылки

1. Турчин АВ, Батин МА. *Футурология. XXI век: бессмертие или глобальная катастрофа?* Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний; 2013. 263 с.
2. Данилов-Данильян ВИ, Рейф ИЕ. *Биосфера и цивилизация*. Москва: Энциклопедия; 2016. 432 с.
3. Kovalenko K, Kovalenko N. Ecological problem of modernity as a global problem of humanity. *MATEC. Web of Conferences*. 2018;193:01033–01040. DOI:10.1051/mateconf/201819301033.
4. Chu S. The world's energy problem and what we can do about it. *Bulletin of the American Academy of Arts and Sciences*. 2008;61(2):1001–1019. DOI:10.2307/40481324.
5. Elachi C, Van Zyl J. *Introduction to the physics and techniques of remote sensing*. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc.; 2006. 584 p.
6. Rees WG. *Physical principles of remote sensing*. Cambridge: Cambridge University Press; 2012. 494 p.
7. Gendzwil DJ, Maybank J. Gravity variations and precipitation onset. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 2011;6(5):1322–1324. DOI:10.1139/e69-134.
8. Marghany M, editor. *Environmental applications of remote sensing*. London: ExU4EvA; 2016. 405 p.
9. Moffatt HK, Shuckburgh E. *Environmental hazards: The fluid dynamics and geophysics of extreme events*. New Jersey: World Scientific; 2011. 333 p.
10. Klapp J, Medina A, Cros A. *Fluid dynamics in physics, engineering and environmental applications*. New York: Springer Heidelberg; London: Dordrecht; 2013. 533 p.
11. Ramachandran S. *Atmospheric aerosols: Characteristics and radiative effects*. Boca Raton: CRC Press; 2018. 295 p.
12. Tomasi C, Fuzzi S, Kokhanovsky A. *Atmospheric aerosols: Life cycles and effects on air quality and climate*. Hoboken: John Wiley and Sons; 2016. 700 p.
13. Loper DE. *Geophysical waves and flows. Theory and applications in the atmosphere, hydrosphere and geosphere*. Cambridge: Cambridge University Press; 2017. 520 p.
14. Barber JR, Warner KA, Theobald DM. Anthropogenic noise exposure in protected natural areas: estimating the scale of ecological consequences. *Landscape Ecology*. 2011;26:1281–1295. DOI:10.1007/s 10980-011-9646-7.
15. Templeton N, editor. *Noise pollution and control*. New York: Library Press; 2017. 297 p.
16. Gill SA, Job JR, Myers K. Toward a broader characterization of anthropogenic noise and its effects on wildlife. *Behavioral Ecology*. 2015;26(2):328–333. <https://DOI.org/10.1093/beheco/aru219>.
17. Dutilleul G. Anthropogenic sound and terrestrial ecosystems: a review of recent evidence. In: *Conference. 12th ICBEN Congress on Noise as a Public Health Problem 2017 June 18–22 Zürich (Switzerland)*. 2017. p. 1–9. URL: <https://www.researchgate.net/publication/321376092>.

18. Salby ML. Physics of the atmosphere and climate. Cambridge: Cambridge University Press; 2012. 717 p.
19. Hughes P, Mason NJ. Introduction to environmental physics: Planet Earth, life and climate. Boca Raton: CRC Press; 2001. 490 p.
20. Schrijver CJ, Bagenal F, Sojka JJ. Heliophysics: Active stars, their astrospheres, and impacts on planetary environments. Cambridge: Cambridge University Press; 2016. 406 p.
21. Benestad RE. Solar activity and earth's climate. Berlin: Springer; 2006. 349 p.
22. Schrijver CJ, Siscoe GL. Heliophysics: Evolving solar activity and the climates of space and Earth. Cambridge: Cambridge University Press; 2010. 526 p.
23. Vallero DA. Environmental contaminants: Assessment and control. Amsterdam: Elsevier Academic Press; 2004. 801 p.
24. Pepper IL, Gerba CP, Brusseau ML. Environmental and pollution science. Amsterdam: Elsevier Academic Press; 2006. 552 p.
25. Ruijgrok GJJ, Van Paassen DM. Elements of aircraft pollution. Cambridge: Delft University Press; 2005. 407 p.
26. Saxena P, Naik V, editors. Air pollution: Sources, impacts and controls. Boca Raton: CAB International; 2019. 233 p.
27. Gurjar BR, Molina LT, Ojha CSP, editors. Air pollution: Health and environmental impacts. Boca Raton: CRC Press; 2010. 556 p.
28. Wolkoff P. Indoor air humidity, air quality, and health – An overview. *International journal of hygiene and environmental health*. 2018;221(3):376–390. DOI:10.1016/j.ijheh.2018.01.015.
29. Jaupart C, Mareschal J-C. Heat generation and transport in the Earth. Cambridge: Cambridge University Press; 2010. 479 p.
30. Hillel D. Environmental Soil physics. Amsterdam: Elsevier Academic Press; 2003. 771 p.
31. Sivakumar MVK, Ndiang'ui N, editors. Climate and land degradation. Berlin: Springer; 2007. 628 p.
32. Teixeira WG, Ceddia MB, Ottoni MV. Application of soil physics in environmental analyses: Measuring, modelling and data integration. Berlin: Springer International Publishing; 2014. 508 p.
33. Iribarne JV, Godson WL. Atmospheric thermodynamics. New York: Springer Science and Business Media; 2012. 260 p.
34. Charles E Baukal Jr. Industrial combustion pollution and control. Boca Raton: CRC Press; 2003. 916 p.
35. Авдеев ВВ, Автономов АБ, Агабабов В. С. *Экология энергетики*. Москва: Издательство МЭИ; 2003. 716 с.
36. Tan Z. Air pollution and greenhouse gases. From basic concepts to engineering applications for air emission control. Berlin: Springer; 2014. 481 p.
37. Jacobson MZ. Air pollution and global warming. History, science, and solutions. Cambridge: Cambridge University Press; 2012. 375 p.
38. Dincer I, Colpan CO, Kadioglu F, editors. Causes, impacts and solutions to global warming. New York: Springer; 2013. 1171 p.
39. Jacobson MZ. Air pollution and global warming: History, science, and solutions. Cambridge: Cambridge University Press; 2012. 375 p.
40. Keith DW, Holmes G, Angelo DSt. Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule*. 2018;2:1573–1594. DOI:10.1016/j.joule.2018.09.017.
41. Sayed ET, Awotwe TW, Elsaid K. A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: Wind, hydro, biomass and geothermal. *Science of the total environment*. 2020;766(5):1445050–1445068. DOI:10.1016/j.scitotenv.
42. Guidi G, Gugliemetti F, Violante AC. Environmental impact of nuclear energy and comparison with the alternatives. In: *Conference. ASME-ATL-UIT 2010 Conference on thermal and environmental issues in energy systems*. Sorrento (Italy). 2010. p. 1–7. DOI:10.13140/RG.2.1.1442.2482.
43. Favretti M. Remarks on the maximum entropy principle with application to the maximum entropy theory of ecology. *Entropy*. 2018;20(11):e20010011 (13 p.). DOI: 10.3390/e20010011.
44. Шредингер Э. *Что такое жизнь с точки зрения физики?* Москва: РИМИС; 2009. 176 с.
45. Harte J. Maximum entropy and ecology. A theory of abundance, distribution, and energetics. New York: Oxford University Press Inc.; 2011. 257 p.
46. Lühr H, Wicht J, Gilder SA, editors. Magnetic fields in the Solar system. Planets, Moons and Solar wind interactions. New York: Springer International Publishing; 2018. 428 p.
47. Langel RA, Hinze WJ. The magnetic field of the Earth's lithosphere. Berlin: Springer; 2011. 429 p.
48. Пресман АС. *Электромагнитное поле и жизнь*. Москва: Наука; 2003. 287 с.
49. Косов АА, Барабанов АА, Ярославцев НА. Роль электромагнитных полей и излучений в системе обеспечения безопасности человека. *Академический вестник УралНИИПроект РААСН*. 2010;1:79–85. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_15120732_13465585.pdf.
50. Enemuoh FO, Ezennaya SO. A review of the effects of electromagnetic fields on the environment. *Health Physics*. 1998;74:494–522. URL: https://www.researchgate.net/publication/317175275_A_review_of_the_effects_of_electromagnetic_fields_on_the_environment.
51. Boeker E, Van Grondelle R. Environmental physics: Sustainable energy and climate change. Hoboken: John Wiley and Sons; 2011. 440 p.
52. Tomkiewicz M. Energy and sustainability, from the point of view of environmental physics. *MRS Energy and Sustainability-A Review Journal*. 2015;2(1):1–13. DOI: 10.1557/mre.2015.14.
53. Fomichev VT, Savchenko AV, Gubarevich GP. Technique of assessment of environmental damage caused by electroplating production facilities (by the example of chromium plating process lines). *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2021;1079(6):062049–062056. DOI:10.1088/1757-899X/1079/6/062049.
54. Chordia M, Nordelöf A, Ellingsen LA-W. Environmental life cycle implications of upscaling lithium-ion battery production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2021;26(10):1–16. DOI:10.1007/s11367-021-01976-0.
55. Petri A-K, Schmiedchen K, Stunder D. Biological effects of exposure to static electric fields in humans and vertebrates: A systematic review. *Environmental Health*. 2017;16(1):41–64. DOI 10.1186/s12940-017-0248-y.
56. Davis ML, Masten SJ. Principles of Environmental Engineering. New York: McGraw-Hill Education; 2013. 912 p.
57. Masters GM, Ela WR. Introduction to environmental engineering and science. London: Education Limited; 2014. 696 p.
58. Ахманов СА, Никитин СЮ. *Физическая оптика*. Москва: МГУ; 2004. 656 с.
59. Longcore T. Ecological light pollution. *Frontiers in ecology and the environment*. 2004;2(4):191–198. DOI:10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2.
60. Тимофеев ЮМ, Васильев АВ. *Теоретические основы атмосферной оптики*. Санкт-Петербург: Наука; 2003. 474 с.
61. Бухтояров ОИ, Несговорова НП, Савельев ВГ. *Методы экологического мониторинга качества сред жизни и оценки их экологической безопасности*. Курган: Издательство Курганского государственного университета; 2015. 239 с.

62. Wong MS, Zhu X, Abbas S. Optical remote sensing. In: *Urban informatics*. 2021. p. 315–344. DOI:10.1007/978-981-15-8983-6_20.
63. Бадрутдинов ОР, Тюменев РС. *Радиоактивность экосистем*. Казань: Казанский университет; 2017. 201 с.
64. Vox MA, Vox GP. Physics of radiation and climate. Paris: Taylor and Francis Group; 2017. 513 p.
65. Андрианов АА, Воропаев АИ, Коровин ЮА. *Ядерные технологии: история, состояние, перспективы*. Москва: НИЯУ МИФИ; 2012. 80 с.
66. Маскевич СА, Батын АН, Зиматкина ТИ. *Радиобиология – медико-экологические проблемы*. Минск: Международный государственный экологический университет имени А. Д. Сахарова; 2019. 306 с.
67. Ашихмина ТЯ. *Экологический мониторинг*. Москва: Академический проект; 2008. 416 с.
68. Ibrahim HS, Hamza Y, Mayhoub F. Effective radiation dose evaluation in nuclear medicine examination. *International Research Journal of Public and Environmental Health*. 2019;6(5):97–104. DOI:10.15739/irjpeh.19.012.
69. Beresford N, Shaw G, Moberg L. Radioactivity in terrestrial ecosystems. In: Smith J, Beresford NA. *Chernobyl: Catastrophe and consequences*. Berlin: Springer; 2005. 338 p.
70. Leeder MR, Pérez-Arlucea M. Physical processes in Earth and environmental sciences. New York: Wiley-Blackwell; 2006. 336 p.
71. Козачек АВ. Опыт и особенности проектирования содержания профессиональной подготовки инженеров-экологов в государствах англосаксонского типа. *Профессиональное образование в России и за рубежом*. 2011;2(4):52–61.
72. Козачек АВ. Содержание профессиональной инженерно-экологической подготовки в странах континентальной Европы. *Профессиональное образование в России и за рубежом*. 2012;1(5):60–66.
73. Boeker E, Grondelle RV, Blankert P. Environmental physics as a teaching concept. *European Journal of Physics*. 2003;24(5):59–67. DOI:10.1088/0143-0807/24/5/301.
74. Nesic L, Raos M. Ecophysics and education. *Facta universitatis. Series: Physics, Chemistry and Technology*. 2006;4(1):101–112. DOI:10.2298/FUPCT0601101N.
75. Boeker E, Van Grondelle R. Environmental science: physical principles and applications. Wiley: [publisher unknown]; 2001. 440 p.
76. Monteith JL, Unsworth MH. Principles of environmental physics. Plants, animals, and the atmosphere. Amsterdam: Elsevier Science; 2014. 422 p.
77. Rodrigues A, Sardinha R, Pita G. Fundamental principles of environmental physics. Berlin: Springer; 2021. 390 p.
78. Bolivar N, editor. Environmental physics. Burlington, Canada: Arcler Press; 2018. 293 p.
79. Brinkman AW. Physics of the environment. London: Imperial College Press; 2008. 213 p.
80. Dzelalija M. Environmental physics. Create Space. California: Independent Publishing Platform; 2014. 64 p.
81. Singh P, Wani TA. Basic environmental physics. New-Deli: Pragati Prakashan; 2016. 140 p.
82. Iribarne JV, Cho H-R. Atmospheric physics. New York: Springer Science and Business Media; 2012. 224 p.
83. Mak M. Atmospheric Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press; 2011. 486 p.
84. Ambaum MHP. Thermal physics of the atmosphere. Hoboken: John Wiley and Sons, Ltd; 2010. 240 p.
85. Stamnes K, Thomas GE, Stamnes JJ. Radiative transfer in the atmosphere and ocean. Cambridge: Cambridge University Press; 2017. 517 p.
86. Narain U. Physics of the Sun and its atmosphere. New York: World Scientific; 2008. 296 p.
87. Şen Z. Solar energy fundamentals and modeling techniques: atmosphere, environment, climate change and renewable energy. London: Springer-Verlag; 2008. 276 p.
88. Lowrie W. Fundamentals of geophysics Cambridge: Cambridge University Press; 2007. 391 p.
89. Poirier J-P. Introduction to the physics of the Earth's interior. Paris: Institut de France; 2000. 326 p.
90. Wang PK. Physics and dynamics of clouds and precipitation. Cambridge: Cambridge University Press; 2013. 467 p.
91. Curry JA, Webster PJ. Thermodynamics of atmospheres and oceans. Amsterdam: Elsevier Academic Press; 1999. 492 p.
92. Shukla MK. Soil physics: An introduction. Cambridge: Cambridge University Press; 2013. 466 p.
93. Bolivar N, editor. Physics of energy sources. Burlington, Canada: Aider Press; 2019. 293 p.
94. Taylor FW. Elementary climate physics. New York: Oxford University Press; 2005. 212 p.

References

1. Turchin AV, Batin MA. *Futurologiya. XXI vek: bessmertnye ili global'naya katastrofa?* [Futurology. XXI century: immortality or a global catastrophe?] Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy; 2013. 263 p. Russian.
2. Danilov-Danil'yan VI, Reif IE. *Biosfera i tsivilizatsiya* [Biosphere and civilization]. Moscow: Entsiklopediya; 2016. 432 p. Russian.
3. Kovalenko K, Kovalenko N. Ecological problem of modernity as a global problem of humanity. *MATEC. Web of Conferences*. 2018;193:01033–01040. DOI:10.1051/mateconf/201819301033.
4. Chu S. The world's energy problem and what we can do about it. *Bulletin of the American Academy of Arts and Sciences*. 2008;61(2):1001–1019. DOI:10.2307/40481324.
5. Elachi C, Van Zyl J. Introduction to the physics and techniques of remote sensing. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc.; 2006. 584 p.
6. Rees WG. Physical principles of remote sensing. Cambridge: Cambridge University Press; 2012. 494 p.
7. Gendzwil DJ, Maybank J. Gravity variations and precipitation onset. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 2011;6(5):1322–1324. DOI:10.1139/e69-134.
8. Marghany M, editor. Environmental applications of remote sensing. London: ExU4EvA; 2016. 405 p.
9. Moffatt HK, Shuckburgh E. Environmental hazards: The fluid dynamics and geophysics of extreme events. New Jersey: World Scientific; 2011. 333 p.
10. Klapp J, Medina A, Cros A. Fluid dynamics in physics, engineering and environmental applications. New York: Springer Heidelberg; London: Dordrecht; 2013. 533 p.
11. Ramachandran S. Atmospheric aerosols: Characteristics and radiative effects. Boca Raton: CRC Press; 2018. 295 p.
12. Tomasi C, Fuzzi S, Kokhanovsky A. Atmospheric aerosols: Life cycles and effects on air quality and climate. Hoboken: John Wiley and Sons; 2016. 700 p.
13. Loper DE. Geophysical waves and flows. Theory and applications in the atmosphere, hydrosphere and geosphere. Cambridge: Cambridge University Press; 2017. 520 p.

14. Barber JR, Warner KA, Theobald DM. Anthropogenic noise exposure in protected natural areas: estimating the scale of ecological consequences. *Landscape Ecology*. 2011;26:1281–1295. DOI 10.1007/s 10980-011-9646-7.
15. Templeton N, editor. Noise pollution and control. New York: Library Press; 2017. 297 p.
16. Gill SA, Job JR, Myers K. Toward a broader characterization of anthropogenic noise and its effects on wildlife. *Behavioral Ecology*. 2015;26(2):328–333. <https://DOI.org/10.1093/beheco/aru219>.
17. Dutilleul G. Anthropogenic sound and terrestrial ecosystems: a review of recent evidence. In: *Conference. 12th ICBEN Congress on Noise as a Public Health Problem 2017 June 18–22 Zürich (Switzerland)*. 2017. p. 1–9. URL: <https://www.researchgate.net/publication/321376092>.
18. Salby ML. Physics of the atmosphere and climate. Cambridge: Cambridge University Press; 2012. 717 p.
19. Hughes P, Mason NJ. Introduction to environmental physics: Planet Earth, life and climate. Boca Raton: CRC Press; 2001. 490 p.
20. Schrijver CJ, Bagenal F, Sojka JJ. Heliophysics: Active stars, their astrospheres, and impacts on planetary environments. Cambridge: Cambridge University Press; 2016. 406 p.
21. Benestad RE. Solar activity and earth's climate. Berlin: Springer; 2006. 349 p.
22. Schrijver CJ, Siscoe GL. Heliophysics: Evolving solar activity and the climates of space and Earth. Cambridge: Cambridge University Press; 2010. 526 p.
23. Vallero DA. Environmental contaminants: Assessment and control. Amsterdam: Elsevier Academic Press; 2004. 801 p.
24. Pepper IL, Gerba CP, Brusseau ML. Environmental and pollution science. Amsterdam: Elsevier Academic Press; 2006. 552 p.
25. Ruijgrok GJJ, Van Paassen DM. Elements of aircraft pollution. Cambridge: Delft University Press; 2005. 407 p.
26. Saxena P, Naik V, editors. Air pollution: Sources, impacts and controls. Boca Raton: CAB International; 2019. 233 p.
27. Gurjar BR, Molina LT, Ojha CSP, editors. Air pollution: Health and environmental impacts. Boca Raton: CRC Press; 2010. 556 p.
28. Wolkoff P. Indoor air humidity, air quality, and health – An overview. *International journal of hygiene and environmental health*. 2018;221(3):376–390. DOI:10.1016/j.ijheh.2018.01.015.
29. Jaupart C, Mareschal J-C. Heat generation and transport in the Earth. Cambridge: Cambridge University Press; 2010. 479 p.
30. Hillel D. Environmental Soil physics. Amsterdam: Elsevier Academic Press; 2003. 771 p.
31. Sivakumar MVK, Ndiang'ui N, editors. Climate and land degradation. Berlin: Springer; 2007. 628 p.
32. Teixeira WG, Ceddia MB, Ottoni MV. Application of soil physics in environmental analyses: Measuring, modelling and data integration. Berlin: Springer International Publishing; 2014. 508 p.
33. Iribarne JV, Godson WL. Atmospheric thermodynamics. New York: Springer Science and Business Media; 2012. 260 p.
34. Charles E Baukal Jr. Industrial combustion pollution and control. Boca Raton: CRC Press; 2003. 916 p.
35. Avdeev VV, Avtonomov AB, Agababov BC. *Ekologiya energetiki* [Energy ecology]. Moscow: Izdatelstvo MEI; 2003. 716 p. Russian.
36. Tan Z. Air pollution and greenhouse gases. From basic concepts to engineering applications for air emission control. Berlin: Springer; 2014. 481 p.
37. Jacobson MZ. Air pollution and global warming. History, science, and solutions. Cambridge: Cambridge University Press; 2012. 375 p.
38. Dincer I, Colpan CO, Kadioglu F, editors. Causes, impacts and solutions to global warming. New York: Springer; 2013. 1171 p.
39. Jacobson MZ. Air pollution and global warming: History, science, and solutions. Cambridge: Cambridge University Press; 2012. 375 p.
40. Keith DW, Holmes G, Angelo DSt. Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule*. 2018;2:1573–1594. DOI:10.1016/j.joule.2018.09.017.
41. Sayed ET, Awotwe TW, Elsaid K. A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: Wind, hydro, biomass and geothermal. *Science of the total environment*. 2020;766(5):1445050–1445068. DOI:10.1016/j.scitotenv.
42. Guidi G, Gugliemetti F, Violante AC. Environmental impact of nuclear energy and comparison with the alternatives. In: *Conference: ASME-ATI-UIT 2010 Conference on thermal and environmental issues in energy systems*. Sorrento (Italy). 2010. p. 1–7. DOI:10.13140/RG.2.1.1442.2482.
43. Favretti M. Remarks on the maximum entropy principle with application to the maximum entropy theory of ecology. *Entropy*. 2018;20(11):e20010011 (13 p.). DOI: 10.3390/e20010011.
44. Shredinger E. *Chto takoye zhizn' s tochki zreniya fiziki?* [What is life from the point of view of physics?] Moscow: RIMIS; 2009. 176 p. Russian.
45. Harte J. Maximum entropy and ecology. A theory of abundance, distribution, and energetics. New York: Oxford University Press Inc.; 2011. 257 p.
46. Lühr H, Wicht J, Gilder SA, editors. Magnetic fields in the Solar system. Planets, Moons and Solar wind interactions. New York: Springer International Publishing; 2018. 428 p.
47. Langel RA, Hinze WJ. The magnetic field of the Earth's lithosphere. Berlin: Springer; 2011. 429 p.
48. Presman AS. *Elektromagnitnoye pole i zhizn* [Electromagnetic field and life]. Moscow: Nauka; 2003. 287 p. Russian.
49. Kosov AA, Barabanov AA, Yaroslavtsev NA. The role of electromagnetic fields and radiation in human security. *Akademicheskii vestnik UralNIIProekt RAASN*. 2010;1:79–85. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_15120732_31465585.pdf. Russian.
50. Enemuoh FO, Ezennaya SO. A review of the effects of electromagnetic fields on the environment. *Health Physics*. 1998;74:494–522. URL: https://www.researchgate.net/publication/317175275_A_review_of_the_effects_of_electromagnetic_fields_on_the_environment.
51. Boeker E, Van Grondelle R. Environmental physics: Sustainable energy and climate change. Hoboken: John Wiley and Sons; 2011. 440 p.
52. Tomkiewicz M. Energy and sustainability, from the point of view of environmental physics. *MRS Energy and Sustainability-A Review Journal*. 2015;2(1):1–13. DOI: 10.1557/mre.2015.14.
53. Fomichev VT, Savchenko AV, Gubarevich GP. Technique of assessment of environmental damage caused by electroplating production facilities (by the example of chromium plating process lines). *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2021;1079(6):062049–062056. DOI:10.1088/1757-899X/1079/6/062049.
54. Chordia M, Nordelöf A, Ellingsen LA-W. Environmental life cycle implications of upscaling lithium-ion battery production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2021;26(10):1–16. DOI:10.1007/s11367-021-01976-0.

55. Petri A-K, Schmiedchen K, Stunder D. Biological effects of exposure to static electric fields in humans and vertebrates: A systematic review. *Environmental Health*. 2017;16(1):41–64. DOI 10.1186/s12940-017-0248-y.
56. Davis ML, Masten SJ. Principles of Environmental Engineering. New York: McGraw-Hill Education; 2013. 912 p.
57. Masters GM, Ela WR. Introduction to environmental engineering and science. London: Education Limited; 2014. 696 p.
58. Akhmanov SA, Nikitin SYu. *Fizicheskaya optika* [Physical optics]. Moscow: MGU; 2004. 656 p. Russian.
59. Longcore T. Ecological light pollution. *Frontiers in ecology and the environment*. 2004;2(4):191–198. DOI:10.1890/1540-9295(2004)002[0191:ELP]2.0.CO;2.
60. Timofeev YuM, Vasil'ev AV. *Teoreticheskiye osnovy atmosferno optiki* [Theoretical foundations of atmospheric optics]. Saint-Petersburg: Nauka; 2003. 474 p. Russian.
61. Bukhtoyarov OI, Nesgovorova NP, Savel'ev VG. *Metody ekologicheskogo monitoringa kachestva sred zhizni i otsenki ikh ekologicheskoy bezopasnosti* [Methods for environmental monitoring of the quality of living environments and assessment of their environmental safety]. Kurgan: Izdatelstvo Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta; 2015. 239 p. Russian.
62. Wong MS, Zhu X, Abbas S. Optical remote sensing. In: *Urban informatics*. 2021. p. 315–344. DOI:10.1007/978-981-15-8983-6_20.
63. Badrutdinov OR, Tyumenev RS. *Radioaktivnost' ekosistem* [Radioactivity of ecosystems]. Kazan: Kazanskiy universitet; 2017. 201 p. Russian.
64. Box MA, Box GP. Physics of radiation and climate. Paris: Taylor and Francis Group; 2017. 513 p.
65. Andrianov AA, Voropaev AI, Korovin YuA. *Yadernyye tekhnologii: istoriya, sostoyaniye, perspektivy* [Nuclear technologies: history, state, prospects]. Moscow: NIYaU MIFI; 2012. 80 p. Russian.
66. Maskevich SA, Batyan AN, Zimatina TI. *Radiobiologiya – mediko-ekologicheskiye problemy* [Radiobiology – Medical and Environmental Problems]. Minsk: Mezhdunarodnyi gosudarstvennyi ekologicheskii universitet imeni A. D. Sakharova; 2019. 306 p. Russian.
67. Ashikhmina TYa. *Ekologicheskii monitoring* [Environmental monitoring]. Moscow: Akademicheskii proekt; 2008. 416 p. Russian.
68. Ibrahim HS, Hamza Y, Mayhoub F. Effective radiation dose evaluation in nuclear medicine examination. *International Research Journal of Public and Environmental Health*. 2019;6(5):97–104. DOI:10.15739/irjpeh.19.012.
69. Beresford N, Shaw G, Moberg L. Radioactivity in terrestrial ecosystems. In: Smith J, Beresford NA. *Chernobyl: Catastrophe and consequences*. Berlin: Springer; 2005. 338 p.
70. Leeder MR, Pérez-Arlucea M. Physical processes in Earth and environmental sciences. New York: Wiley-Blackwell; 2006. 336 p.
71. Kozachek AV. Experience and design features of the content of professional training of environmental engineers in the Anglo-Saxon-type states. *Professional'noe obrazovanie v Rossii i za rubezhom*. 2011;2(4):52–61. Russian.
72. Kozachek AV. The content of professional engineering and environmental training in continental Europe. *Professional'noe obrazovanie v Rossii i za rubezhom*. 2012;1(5):60–66. Russian.
73. Boeker E, Grondelle RV, Blankert P. Environmental physics as a teaching concept. *European Journal of Physics*. 2003;24(5):59–67. DOI:10.1088/0143-0807/24/5/301.
74. Nesic L, Raos M. Ecophysics and education. *Facta universitatis. Series: Physics, Chemistry and Technology*. 2006;4(1):101–112. DOI:10.2298/FUPCT0601101N.
75. Boeker E, Van Grondelle R. Environmental science: physical principles and applications. Wiley: [publisher unknown]; 2001. 440 p.
76. Monteith JL, Unsworth MH. Principles of environmental physics. Plants, animals, and the atmosphere. Amsterdam: Elsevier Science; 2014. 422 p.
77. Rodrigues A, Sardinha R, Pita G. Fundamental principles of environmental physics. Berlin: Springer; 2021. 390 p.
78. Bolivar N, editor. Environmental physics. Burlington, Canada: Arcler Press; 2018. 293 p.
79. Brinkman AW. Physics of the environment. London: Imperial College Press; 2008. 213 p.
80. Dzelalija M. Environmental physics. Create Space. California: Independent Publishing Platform; 2014. 64 p.
81. Singh P, Wani TA. Basic environmental physics. New-Deli: Pragati Prakashan; 2016. 140 p.
82. Iribarne JV, Cho H-R. Atmospheric physics. New York: Springer Science and Business Media; 2012. 224 p.
83. Mak M. Atmospheric Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press; 2011. 486 p.
84. Ambaum MHP. Thermal physics of the atmosphere. Hoboken: John Wiley and Sons, Ltd; 2010. 240 p.
85. Stamnes K, Thomas GE, Stamnes JJ. Radiative transfer in the atmosphere and ocean. Cambridge: Cambridge University Press; 2017. 517 p.
86. Narain U. Physics of the Sun and its atmosphere. New York: World Scientific; 2008. 296 p.
87. Şen Z. Solar energy fundamentals and modeling techniques: atmosphere, environment, climate change and renewable energy. London: Springer-Verlag; 2008. 276 p.
88. Lowrie W. Fundamentals of geophysics Cambridge: Cambridge University Press; 2007. 391 p.
89. Poirier J-P. Introduction to the physics of the Earth's interior. Paris: Institut de France; 2000. 326 p.
90. Wang PK. Physics and dynamics of clouds and precipitation. Cambridge: Cambridge University Press; 2013. 467 p.
91. Curry JA, Webster PJ. Thermodynamics of atmospheres and oceans. Amsterdam: Elsevier Academic Press; 1999. 492 p.
92. Shukla MK. Soil physics: An introduction. Cambridge: Cambridge University Press; 2013. 466 p.
93. Bolivar N, editor. Physics of energy sources. Burlington, Canada: Aider Press; 2019. 293 p.
94. Taylor FW. Elementary climate physics. New York: Oxford University Press; 2005. 212 p.

Статья поступила в редколлегию 15.07.2021.
Received by editorial board 15.07.2021.

УДК 373.1

ДОСТУПНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Е. Н. ДЗЯТКОВСКАЯ¹⁾, Г. К. ДЛИМБЕТОВА²⁾, А. Д. ДЗЯТКОВСКИЙ³⁾

¹⁾Институт стратегии развития образования Российской академии наук,
ул. Жуковского, 16, 105062, г. Москва, Россия

²⁾Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
ул. Сатпаева, 2, 010000, г. Нур-Султан, Казахстан

³⁾Компания по разработке программного обеспечения «Платинум»,
остров Хоуп, 4212, г. Квебек, Австралия

Рассмотрена проблема достижения доступного и качественного образования, поставленная Глобальной программой действий в области образования для устойчивого развития (2014). Раскрывается связь доступности образования с приданием ему инклюзивного характера в его широком понимании, как образования для всех. Автор выдвигает гипотезу о том, что многие из трудностей, которые возникают при организации инклюзивного образования, могли бы быть устранены еще на стадии проектирования образовательной среды. Проанализированы запросы современной педагогики к образовательным средам общего образования и сделан вывод о том, что в них не в полной мере отражены интересы инклюзивного образования.

Цель исследования – принципы проектирования доступной образовательной среды общеобразовательных организаций, реализующих инклюзию. Рассмотрены общие и специальные подходы к проектированию доступной образовательной среды в условиях инклюзии.

Обоснована роль здоровьесберегающего и развивающего характера образовательной среды, а также ее культурно-и природосообразности для обеспечения доступности образования для всех обучающихся, как субъектов учебной деятельности и субъектов здоровья.

Ключевые слова: образовательная среда; инклюзия; доступность; адаптивность.

Благодарность. Работа выполнена в рамках научно-технической программы ИРН OR11465474 «Научные основы модернизации системы образования и науки» по разделу «Проведение исследования доступности и эффективности образовательного пространства в школах страны и разработка модели эргономичного образовательного пространства» (Республика Казахстан).

Образец цитирования:

Дзятковская ЕН, Длимбетова ГК, Дзятковский АД. Доступное образование: проектирование образовательной среды для устойчивого развития. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2021;4:20–27 (на англ.).
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-20-27>

For citation:

Dziatkovskaya EN, Dlimbetova GK, Dziatkovskii AD. Accessible education: designing the educational environment for sustainable development. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2021;4:20–27.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-20-27>

Авторы:

Елена Николаевна Дзятковская – доктор биологических наук, профессор; ведущий научный сотрудник лаборатории теоретической педагогики и философии образования.
Гайни Кареевна Длимбетова – доктор педагогических наук, профессор.
Антон Дмитриевич Дзятковский – кандидат технических наук; исполнительный директор.

Authors:

Elena N. Dziatkovskaya, doctor of science (biology), full professor; leading researcher at the laboratory of theoretical pedagogy and philosophy of education.
dziatkov@mail.ru
Gaini K. Dlimbetova, doctor of science (pedagogy), professor.
gainid@mail.ru
Anton D. Dziatkovsky, PhD (engineering); executive director.
dzyatkovskiy.a@gmail.com

ACCESSIBLE EDUCATION: DESIGNING THE EDUCATIONAL ENVIRONMENT FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT

E. N. DZIATKOVSKAYA^a, G. K. DLIMBETOVA^b, A. D. DZIATKOVSKI^c

*^aInstitute for Strategy of Education Development, Russian Academy of Education,
16 Zhukovsky street, Moscow 105062, Russia*

*^bEurasian National University after named L. N. Gumilyov,
2 Satpayev street, Nur-Sultan 010000 Kazakhstan*

*^cPlatinum Software Development Company,
Hope Island, 4212, Quebec, Australia*

Corresponding author: E. N. Dziatkovskaya (dziatkov@mail.ru)

The problem of achieving accessible and quality education set by the Global Action Programme on Education for Sustainable Development (2014) is discussed. It reveals the connection between accessibility of education and making it inclusive in its broadest sense, as education for all. The author hypothesizes that many of the difficulties that arise in the organization of inclusive education could be eliminated at the stage of designing the educational environment. The requests of modern pedagogy for educational environments of general education are analyzed and it is concluded that they do not fully reflect the interests of inclusive education. The aim of the study was to the principles of designing an accessible educational environment of general education organizations that implement inclusion. The general and special approaches to designing an accessible educational environment in conditions of inclusion were considered. The role of health-saving and developing character of the educational environment, and also its cultural and natural appropriateness to provide accessibility of education for all students as subjects of educational activity and subjects of health is grounded.

Keywords: educational environment; inclusion; accessibility; adaptability.

Acknowledgments. The work was carried out in the IRN scientific and technical program OR11465474 «Scientific foundations of modernization of education and science» in the section «Conducting research on accessibility and efficiency of educational space in schools of the country and development of a model of ergonomic educational space» (Republic of Kazakhstan).

Problem Statement

Accessible and quality education for all throughout life is a highly humanistic goal of civilization in the 21st century. The whole world supported it by adopting the Sustainable Development Agenda in 2015.

Many educators have pointed to the possibility of integrating children with developmental disabilities into the environment of normally developing peers. L. S. Vygotsky wrote: «It is extremely important from the psychological point of view not to confine abnormal children into special groups, but to practice their interaction with other children as widely as possible» [1].

After the Second World War, on a wave of active mastering by the world community of the global humane idea of human rights (the Universal Declaration of Human Rights, 1948) the number of adherents of joint training of usual children and children with limited opportunities began to grow in all countries. The time was characterized by the transition from a «culture of usefulness» to a «culture of dignity», in which the leading value is the value of the person, regardless of whether something can be gained from it to perform a particular task or not. At the turn of the 20th and 21st centuries, the leaders of several advanced powers at once named this direction of the educational process as a priority concept. In 1994, in Salamanca, the World Conference on Special Needs Education, held under the auspices of UNESCO, coined the term «inclusion» and proclaimed the principles of inclusive education.

As for children with disabilities inclusion is a way to eliminate discrimination in the educational process, a key to social justice, overcoming social isolation, the possibility of exercising the rights of people with disabilities to jobs, the possibility of social elevator [2].

In world practice, historically, the first option of inclusion was represented by the mainstream (general flow) in world practice. It does not provide for special efforts of teachers to adapt the child to school or school to child. In these conditions children of pedagogical risk group actually dropped out of education at its initial stage and became underachievers as they progressed through the stages of school education, were left to repeat schooling, fell into the risk group for behavioral deviations. Their transfer from a «usual» class to compensatory (pedagogical support) or corrective (special) education classes was accompanied by psychological traumas and could significantly slow down their socialization and self-realization.

The option of integration (inclusion in the narrow sense) involves the school's efforts to adapt children with developmental disabilities to school. Their own programs are used for them, while other children study in general education, joining in common classes, performing common work.

Inclusive education in the broad sense is such an organization of the learning process, in which all children, regardless of their physical, mental, intellectual, cultural, ethnic, linguistic or other characteristics, are included in the general education system, receiving permanent or occasional some kind of corrective or psychological and pedagogical assistance. In European countries, which were the first to embrace inclusion, the process of its implementation has already taken several decades, but cannot yet be considered complete [3; 4].

Inclusion implies systemic changes in secondary, vocational and higher education simultaneously at three levels: macro (policy, law, funding structure), meso (municipal education management, schools), micro (class, educational process) and requires a long time [5; 6].

We emphasize that every child at a certain period of life needs help, sympathy, support due to family circumstances, moving to another place of residence, because of illness, the need for rehabilitation, ill health, fatigue, etc. Inclusion is a multitude of opportunities for all without crossing out or emphasizing. Everyone has the right to respect, the right to be themselves, to remain different from others. Inclusion is not a girl in a stroller, but «we sang and ate ice cream with her»; not a boy with autism, but «we made a snowman together».

The problem is the unexplored question: to what extent the approaches to the design of modern educational environments of general educational organizations take into account global trends to make all education inclusive [7]?

The aim of the study is to the approaches to the design of modern educational environments in general educational institutions from the perspective of the implementation of inclusive education objectives.

Results and their discussion

Educational environment is a set of influences, conditions, factors and opportunities for the formation and development of personality in its social and spatial-subject environment [8]. The concept of «environment» first appeared in the Enlightenment. It was introduced into philosophy by I. Taine, the founder of the cultural-historical school of art history. Jean Jacques Rousseau considered it necessary to create a special «educational environment» where the needs and opportunities of the student would not only be taken into account and balanced, but also the possibility of self-education. Célestin Fresne also believed that the educational environment helps people to develop their individual abilities and capabilities, and the task of the adult is to properly manage this environment, contributing to the maximum development of the child's personality.

In Russia, a lot of research is devoted to the design of the educational environment, including its spatial-subject, communicative, technological and informational components [9; 10], although the concept of «educational environment» is absent in the normative documents. In special education the notion of a special educational environment is stipulated by normative documents [11]. The special educational environment is considered as a subject-space environment for children with disabilities in accordance with the nature of the disability [12]. Peculiarities of the organization of the subject educational environment in inclusive education are regulated normatively [13]. However, the features of the organization of an inclusive educational environment in its integrity remain understudied [5; 14]. Since inclusion is implemented in a narrow sense, as the simultaneous education of children in a class by different programs – general education and «adapted» programs («side by side, but not together»), the recommendations for the organization of an inclusive educational environment are compilative in nature.

Let's consider for example the pedagogical recommendations on the creation of the subject-space organization of educational environments in general educational organizations [15; 16].

General pedagogy defines the following requirements for the design of object-spatial environments:

- functional and constructive appropriateness;
- layout, justified by the nature of students' activities, age features of students;
- functional division of the interior space;
- unity of all elements of the interior, aimed at fulfilling the main task of creating the best conditions for education and upbringing in a school building;
- compactness, convenience, safety and maximum adaptability to the peculiarities of educational activity;
- consideration of the specifics of the subject being studied;
- taking into account the age of the pupils (for elementary school pupils preference is given to single tables complete with chairs because this allows to change the traditional classroom layout and place tables in a semicircle, perimeter, in a square, etc. depending on the type of activity of the children and the form of their communication between themselves and with the teacher);
- avoiding space overload and emphasizing the main and the secondary;
- prolonging learning work without reducing mental performance;
- inclusion of decorative elements (monumental and decorative painting, sculpture, mosaic, stained glass, paintings) which have a semantic meaning and can be used for relaxation or educational purposes;

- the use of transformer elements that allow the environment to change depending on the activity of the students;
- exclusion of bright, provoking colors and their disharmonious combination;
- ensuring coziness and creating nooks for privacy;
- harmonization of sizes, proportions, light and colors;
- compliance with modern didactic requirements and ergonomics;
- compliance with the ergonomic work of the visual apparatus of the subjects of education;
- taking into account the need for rest for both students and teachers and staff;
- compliance with standards for school furniture;
- compliance with lighting requirements;
- taking into account the possibility of changing postures and body positions while studying (furniture with high legs, desk chairs, overhead bollards, desks so that a child can change the posture from «sitting» to «standing» directly in the course of the lesson;
- opportunities to meet basic physiological needs during the lesson (e. g., a tea area in the classroom, simple exercise equipment in the classroom, a mat, massage mats);
- comfort of the teacher's workplace;
- blackboard in green, at a comfortable height for children, wide enough (blackboard-book, 3 m);
- provision with technical teaching aids;
- culture of using the blackboard (glove, crayons of additional color relative to the color of the blackboard);
- ergonomic design of the walls (to provide eye saccades, exercises to relieve eye fatigue);
- consideration of new organizational forms of the educational process (transferring the emphasis from the class-lesson form of classes to a system of individual and group classes, creating conditions and opportunities for mutual communication, consultation, helping students to each other, self-learning), which should be provided in the structural areas of the classroom, their equipment.

V. A. Yasvin singles out the following principles of optimal spatial and subjective educational environment: the principle of diversity (heterogeneity) and complexity, providing the possibility of spatial and subjective choice by all participants in the educational process; connection of different functional areas; flexibility and controllability of the environment; symbolism; personalization (individualization) of the environment, providing the subjects of the educational process an opportunity to meet the needs of a personalized space [17].

From the point of view of the theory of organization of inclusive educational environments, the principle of heterogeneity and complexity is the possibility of making choices by the subjects of the educational process, creating a variety of «micro environments», including motor, sensory, manipulative-cognitive, play and artistic activities. Connectivity of different functional zones is the possibility of multifunctional use of those or other elements of the subject environment. An example of such an environment is given by the American ethnographer N. Johnson – it is a structured environment of the cave of ancient man, which provided, among other things, the formation of children's social and cultural experience. The principle of flexibility and manageability of the environment is the possibility of its creation, encouraging students to be active, make independent decisions, authorship in the creation of the environment (starting from their desk and up to social projects in the neighborhood). Symbolism of the environment allows you to form a sense of cohesion and consciousness, so that no one feels superfluous and unnecessary. Personalization of the environment allows you to move from the position: «everything is nobody's, everything is the same» to functioning in the most favorable rhythm for everyone, corresponding to their age, sex, individual characteristics.

However, the main requirements for the organization of an inclusive educational environment – its accessibility and adaptability – are not directly mentioned. But it is precisely these properties that an inclusive education environment should have, according to the Federal State educational standard for primary general education for students with disabilities [13].

In addition, according to our research, it is necessary to combine special measures with general approaches to inclusive educational environment, that focus on the health and development of the child. General and special approaches to the organization of educational environments are interrelated and, without duplicating, complement each other. Only in this unity can they be effective.

General approaches to the design of inclusive educational environments are based on the principles of humanism, equality, cooperation, the value of uniqueness of each person, respect for educational needs and capabilities of each child («diversity includes everyone», «everyone is talented in his/her own way», «we are different, but we are together») [18]. General approaches to the design of educational environments under conditions of inclusion are purposefully implemented by teachers non-specific (not depending on the clinical diagnosis) and continuous orientation of the educational process to the formation of students as subjects of learning activities and health subjects – health-saving and developing approaches [19].

The magnitude of health and development resources in all people is different, but their composition is the same. These are socio-cultural, personal, intellectual, psycho-emotional, psychophysical resources.

The formation of socio-cultural resources of students' health and development is provided by teachers' work on:

- ensuring the culturally appropriate nature of the educational process: immersion of students in the culture of the peoples of Russia, their appropriation of national cultural values; formation of cultural identity as a condition for raising a mentally healthy generation; overcoming ethnocultural dissociation;
- creating an atmosphere of respect for all subjects of education without exception; the value of each person individually and the diversity of others, the value of cultural diversity; corporate spirit and cooperation; prevention (or overcoming the consequences) of social isolation of students (including children with disabilities, persons with disabilities, children from migrant families);
- to develop communicative universal learning activities in all students; motivation and skills to kindly interact with others; positive socio-cultural personal experience of communicating with people with and without disabilities, both in school and outside it;
- improving the culture of teaching and communication at school;
- psychological and pedagogical education of the family.

The formation of personal resources of students' health and development is ensured by the readiness of teachers to optimistically forecast the development of each student, to form in each child

- belief in his or her own capabilities and unique abilities («everyone is talented in his or her own way»);
- personal and regulative universal learning activities and skills;
- creative personality, perceiving the language of music, plastics, art word, fine and decorative art, folk crafts, technical creativity; acquiring personal experience of creative self-realization in different spheres and application of their creative abilities through activity tests;
- practical experience of safe behavior in different life situations, self-service, taking care of relatives, house-keeping, participation in public affairs;
- motivation for self-organization, self-improvement, critical self-analysis without blaming others for their failures.

The formation of students' intellectual resources of health and development is provided by the work of teachers on

- maintaining and developing students' cognitive and learning interest, their learning motivation, as a condition for self-development;
- mastering by students cognitive universal learning activities and skills as a means of «getting around» the difficulties of learning associated with their disabilities, as well as a tool for self-knowledge, self-education, and self-help;
- mastering by students of varied ways and methods of remembering, processing, presenting, understanding and using information, the skills of conscious choice of individually rational ways and methods of learning, self-assessment as a condition of successful adaptation to the changing conditions of the world around them;
- creation of educational situations of dialogue between rational and irrational in knowledge, feelings and logic, scientific and everyday concepts, general cultural and personal-emotional content, abilities to use associations, analogies, artistic and conceptual metaphors, symbols, as conditions of expansion of protective-compensatory possibilities of organism and personality, human life resistance in the global world.

The formation of students' psycho-emotional resources of health and development is provided by the work of teachers to create conditions for

- observance of the regime of study and rest, as the most important condition for a healthy lifestyle;
- development of emotional intelligence (the ability to understand the emotions of others and the state of natural objects, adequately express their emotions), as a condition for normal mental development and psychosomatic health;
- physical, musical, artistic, labor development of students, including through extracurricular activities and additional education;
- prevention of natural deprivation of students, which inhibits the development and reduces the health of the child (making up for the lack of a variety of natural sounds, rhythms, shapes, colors, movements in the child's environment).

The formation of students' psychophysical resources of health and development is provided by the work of pedagogical and medical staff to create conditions for

The formation and realization of an individually rational healthy (correct) way of life, taking into account the existing diseases and the peculiarities of the environmental situation in the place of residence on the basis of self-knowledge, understanding of their strengths and weaknesses, readiness for self-development.

The purpose and meaning of accessible education for children in a general (mass, non-special) education institution is the full development and self-realization of children, regardless of the specific educational needs and health status of students, mastering their general education program (state educational standard), the most important social skills along with their peers, taking into account their individual and typological features in cognitive, physical, social and emotional development.

The accessibility of the physical and spatial educational environment should not be reduced only to providing comfortable and effective access to the premises and removing physical barriers for all children. Accessible environment is information, communication, transportation so that a person with limited abilities can feel completely independent. There should be comfortable workplaces for students, rooms (areas) for rest and recuperation. Classrooms shall have spaces that provide opportunities for recreation, extracurricular and in-class activities. There shall be rooms for specialists: a teacher-psychologist, a speech therapist, a speech pathologist. The building shall have rooms for therapeutic, preventive, recreational, and diagnostic work. Timing is set in accordance with the FSES for children with disabilities, the Federal Law «On Education», SanPiN, the orders of the Ministry of Education and Science.

The length of the school day for a particular child is determined taking into account his or her specific educational needs and readiness to be without parents among his or her peers. It is necessary to provide for parallel lessons and extracurricular activities, including remedial and developmental activities. Extracurricular activities may be carried out in the afternoon of the school day, which are connected both with the implementation of the remedial program and the plans for additional education of the children. During the lesson, physical exercises (physical activity breaks) aimed at relieving muscular tension are necessarily provided. The class should have for this purpose simulators, including those to prevent visual fatigue, hiking and massage mats, a small sports corner, a ball to correct posture, 1–2 standing workstations with benches, a «tea» area, for elementary school – a zone of favorite toys.

School textbooks and other materials should be placed at such a distance that a child can reach them with his hand without assistance, the use of a stand for books is mandatory. The child in the classroom must have open access to the information on the blackboard, information boards, etc. Personal computers adapted for children with disabilities may be installed on the desk.

Recreational facilities should provide play activities accessible to all children, carrying a corrective and developmental nature. They should allow the organization of children's games, including folk games, the corrective effect of which has been proved by science (including neuropsychology), and multi-generational historical experience of raising mentally healthy generations. These games develop attention, memory, self-control, the ability to switch from one speed of work to another, sensorimotor coordination, etc. Thus, in recreational areas there can be organized zones for playing «classics», «rubber band» and other moving games, as well as zones for board games and even dances – theories of free movement to music.

Adaptability of the educational environment is its culture- and nature-appropriateness, on the one hand, and its openness to each learner on the basis of feedback, on the other hand. An important task of the educational environment is to reduce social and natural deprivation of the child, to realize his/her needs, including special ones, in adapting to the natural and social environment [20].

The physical environment should be full of objects and information about cultural heritage objects (architectural, visual, applied, musical, theatrical, cinematographic) of the native land, country, peoples of Russia living in this area, about the historical memory of the Russians, about the cultural life of the school. Immersing children in the context of cultural values gives them an opportunity to reflect on their personal aspirations, sets guidelines, and awakens a desire for cultural creation and self-realization.

The subject environment should also be nature-appropriate, saturated with natural objects and information about the nature of the native land, country, their natural heritage, eliminate the negative effects of natural deprivation. It is no accident, experts in the structure of the accessible educational environment distinguish three components: spatial (physical) component, socio-cultural component (communicative and program-information) and the natural component, as an independent. Each of them serves not only as a background of training, education and development, but also as a means, acting as a «third teacher. The natural component is extremely important for activation of protective-compensatory forces of an organism. Natural deprivation is a significant factor in reducing the resources of especially the growing body. It is important to immerse children in the world of real natural sounds, direct contacts with animate and inanimate nature, actively using minerals, fruits, branches, indoor plants.

To reduce color deprivation, especially in the fall and winter, it is important to provide a competent color solution for classrooms and other rooms, taking into account the psycho-physiological laws of the influence of color on a child. Inclusion of bright color spots in the interior helps regulate the physical and mental work capacity of children. It was found, for example, that placing circles of yellow (sunny), green (grass) and red, each 20 cm in diameter, above the blackboard helps children control their psycho-emotional states (for example, fear) and motor activity (hyperactivity).

Accessible and adaptive educational environment is a varied environment, which gives an opportunity to form with the help of general and special education teachers personal educational environments of students - a specific space of possibilities for the child, allowing to meet his or her needs. This is a zone of child activity, being in the educational environment; «territory» of his/her closest development, in which a student shows himself/herself as a subject (shows his/her individual-typological features, preferences, aspirations, realizes different types of activity taking into account the meaning, goals, objectives, pace, forms and methods of learning, personal educational content, self-assessment of results. Personal educational environment of each child with disabilities has its own features, reflecting the specifics of motivational and semantic area of the child, his preferred choices, aspirations, the specifics of learning difficulties, the focus of remedial and developmental support.

The effectiveness of personal educational environments largely depends on how much the students themselves are the subjects of their creation and how open personal environments are to the educational environment of the educational organization and interact with it. If the personal educational environment is isolated, the effectiveness of corrective and developmental assistance to a child is significantly reduced, because successful individualization of the educational process requires an educational environment that implements a nonspecific health-saving developmental effect and trains the adaptive and protective-compensatory forces of the body.

Accessible adaptive educational environment should have the necessary information support not only for students, but also for specialists of general and special education, as well as for specialists of the support system, providing electronic libraries, portals and sites, remote advisory service, as well as for parents. In addition, information support provides for the creation and accumulation of a personal database of students, the coordination of all specialists, their regular and high-quality interaction, the exchange of information among themselves and with the family, as well as the possibility of obtaining external advice from qualified specialists in complicated cases.

The implementation of accessibility and adaptability approaches to the organization of an inclusive educational environment is manifested in:

- the balance of academic knowledge and social skills acquired in the process of education – adequate to the individual-typological features and relevant needs of the child and his family;
- the trinity of approaches to the organization of the educational environment in a combination of its cognitive (mastering the general educational program), behavioral (teamwork, cooperation, mutual assistance) and social-emotional (empathy, respect in communication, creative activity, social activity) effects;
- compromise between general and special education, creating and maintaining an atmosphere of acceptance, tolerance, cooperation; acceptance and consideration of differences, individual uniqueness of students and creating a situation of success for all students;
- adaptation of the child to the educational environment and the school to the child through the educational environment, variability of approaches, methods and forms of social adaptation (rehabilitation);
- optimization of the material, technical, regulatory, methodological, financial and economic, and organizational resources [15], including
 - accessibility of classrooms and other premises of the institution (elimination of barriers, ensuring the friendly environment of the institution);
 - equipping the educational process with assistive tools and technologies (technical means of providing comfortable and effective access);
 - corrective and developmental nature of the subject learning and socialization environment;
 - creation of premises (zones) for recreation and recovery;
 - provision of the subject-spatial conditions for psychological and pedagogical support;
 - consolidation of the pupil team, the development of skills of cooperation, interaction and mutual assistance.

14-year experience of organizing an inclusive educational environment in general education schools, combining the principles of accessibility and adaptability, general and special approaches was accompanied by biochemical, physiological, electrophysiological, psychological and sociological studies of students and is described in detail in a number of monographs [20; 21]. In general, it has been shown that such an environment allows to almost halve the frequency of psychosomatic disorders and school dysadaptation of students, increases their social inclusion.

Conclusion

Comparing approaches to the organization of the educational environment, historically separated in general and special education, is an urgent task in connection with the development of the inclusive education and the problems it faces. Usually these problems are associated with the understanding of inclusion as integration, when the classroom, in fact, turns into the territory of separate education of two groups of children – with «normative» and «non-normative» development at the same time. The transition to true inclusion, as education for all, means the creation of a single common and numerous personal educational environments that allow meeting the edu-

cational needs of each student, regardless of the presence of a diagnosis. The educational environment is seen as an important means of such a transition. Our research proves that the mandatory qualities of a single inclusive educational environment for all are its accessibility, adaptability, health-saving and developmental nature.

References

1. Vygot'skij L.S. Fundamentals of Defectology. Saint Petersburg: Lan'; 2003. 654 p. Russian.
2. Bogdanova TG, Gusejnova LA, Nazarova NM, Prihod'ko OG, et al. Pedagogika inkluzivnogo obrazovaniya. Moscow: Infra-M; 2018. 335 p. Russian.
3. Grindal T, Hehir T, Freeman B, Lamoreau R. A summary of the research evidence on inclusive education. *Instituto Alana Rua Fradique Coutinho, 50 Il. andar, Pinheiros*. São Paulo: [publisher unknown]; 2016. 40 p.
4. Thomas G. A review of thinking and research on inclusive education policy with suggestions for a new kind of inclusive thinking. *British Journal of Educational Research*. 2012;38(3):473–490.
5. Education Exploratory study on the inclusion of pupils with complex support needs in mainstream schools. In: Inclusion Europe. The European association of societies of persons with intellectual disabilities and their families. URL: https://www.inclusion-europe.eu/wp-content/uploads/2019/01/IE_CSN_Education_Report_Final-1.pdf
6. Boyle C, Koutsouris G, Salla Mateu A, Anderson J. The matter of 'evidence' in the inclusive education debate. 2020. DOI: 10.1093/acrefore/9780190264093.013.ORE_EDU-01019.R1
7. Kryzhanovskaya AA. Peculiarities of inclusive education in Russia. *Nauka cherez prizmu vremeni*. 2018;11(20):32–40. Russian.
8. Bonaccio S, Connelly C, Gellatly I, Jetha A, Martin G, Kathleen A. Participation of people with disabilities in the workplace across the employment cycle: employer concerns and research evidence. *Journal of Business and Psychology*. 2020;35 (2):135–158. DOI:10.1007/s10869-018-9602-5. 7114957 PMC.PMID 32269418.
9. Yasvin VA. Educational environment: from modeling to design. Moscow: Izdatel'stvo Smysl; 2001. 365 p. Russian.
10. Baeva IA. Psychological safety in education. Saint Petersburg: Izdatel'stvo SOYUZ; 2002. 271 p. Russian.
11. On Approval of the Procedure for Ensuring Accessibility for Persons with Disabilities of Educational Facilities and Services. URL: <http://base.garant.ru/70862366/> Russian.
12. Malevanov EYu. Theoretical aspects of modeling an active educational environment for children with disabilities. *Vestnik TGU*. 2007;3. Russian.
13. On approval of the federal state educational standard for primary general education for students with disabilities. URL: <http://base.garant.ru/70862366/> Russian.
14. Alekhina SV. Inclusive education: results, experiences and prospects: proceedings of the III International scientific-practical conference. Moscow: Izdatel'stvo MGPPU; 2015, p. 304–318. Russian.
15. Semenovskikh T, Parunina L, Bagapova N. Designing a model of inclusive educational environment for preschool children. *Pedagogicheskie nauki*. 2020;1(23). DOI: <http://doi.org/10.15350/2409-7616.2020.1>.
16. Kozyreva OA. Creating an Inclusive Educational Environment as a Social and Pedagogical Problem. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta*. 2014;1(142):112–115. Russian.
17. Shulekina J, Novikova D, Abayeva M. Culture of an inclusive educational organization as an indicator of the quality of education in a contemporary metropolis. *SHS*. 2021;98:01020. DOI: <https://DOI.org/10.1051/shsconf/2021980102>
18. Dzyatkovskaya EN. Cooperation of general and special approaches to overcoming learning difficulties of children with disabilities. *Sovremennoe pedagogicheskoe obrazovanie*. 2021;10:203–207. Russian.
19. Dzyatkovskij AD. Ideas of sustainable development in management science. In: Dzyatkovskaya EN, Zahleby AN, editors. *Idei ustojchivogo razvitiya v istorii, kul'ture, obrazovanii*. Mezhdunarodnaya kollektivnaya monografiya (Rossiya – Kazahstan – Belarus' – Moldova. Kafedra YUNESKO fakul'teta global'nyh processov MGU im. M. I. Lomonosova. Moscow: Izdatel'stvo Pero; 2021. p. 36–42. Russian.
20. Dzyatkovskaya EN, Kolesnikova LI, Dolgih VV. The information space and the health of schoolchildren. Novosibirsk: Nauka; 2002. 132 p. Russian.
21. Kolesnikova LI, Dzyatkovskaya EN, Dolgih VV, Polyakov VM, Rychkova LV. Adaptive and developmental strategy for preserving schoolchildren's health. Moscow: Literai 2013. 200 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 30.11.2021.
Received by editorial board 30.11.2021.

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК 574.34

БИОТОПИЧЕСКОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИНВАЗИВНОГО ВИДА – *DREISSENA POLYMORPHA* (MOLLUSCA, BIVALVIA) В ОЗЕРЕ НАРОЧЬ (БЕЛАРУСЬ) В 2016–2017 ГГ.

Д. В. КРЮК¹⁾, А. А. ЖУКОВА¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Исследование состояния популяции *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) в оз. Нарочь было выполнено в летние месяцы 2016–2017 гг. Для оценки распределения популяции дрейссены на различных глубинах оз. Нарочь было обследовано 9 трансект, на которых дрейссена обнаружена в пробах, отобранных на глубинах от 0,5 до 8 м. По результатам исследования было выявлено, что максимальных величин плотности и биомассы в расчете на 1 м² площади дна дрейссена достигала на глубинах 2–6 м в пробах, где макрофитом-субстратом была хара. Вероятно, это связано с особенностями развития харовых водорослей (неполное отмирание в зимний период), их морфологией (сильная разветвленность таллома и, как следствие, большая площадь поверхности для прикрепления), тем фактом, что харовые водоросли являются активными карбонатоосадителями (шероховатая поверхность облегчает прикрепление велигеров к растению). Установлено, что средняя индивидуальная масса особей дрейссены, развивающихся на грунте

Образец цитирования:

Крюк ДВ, Жукова АА. Биотопическое распространение инвазивного вида – *Dreissena polymorpha* (Mollusca, Bivalvia) в озере Нарочь (Беларусь) в 2016–2017 гг. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;4:28–35 (на англ.).
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-28-35>

For citation:

Kryuk DV, Zhukava NA. Biotopic distribution of invasive species – *Dreissena polymorpha* (Mollusca, Bivalvia) in lake Naroch (Belarus) in 2016–2017. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;4:28–35.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-28-35>

Авторы:

Дарья Вячеславовна Крюк – младший научный сотрудник гидроэкологии биологического факультета.
Анна Анатольевна Жукова – кандидат биологических наук, доцент; начальник Нарочанской биологической станции им. Г. Г. Винберга.

Authors:

Darya V. Kruk, junior researcher at the laboratory of hydroecology, faculty of biology.
KrukDV@bsu.by
Hanna A. Zhukava, PhD (biology), docent; head of the Naroch biological station named after G. G. Vinberg.
anna_eco@tut.by

в прибрежной зоне, оказалась существенно больше, чем у особей, которые развиваются на макрофитах. После сравнения полученных нами данных с данными предыдущих исследований можно заключить, что за последние два десятилетия величины плотности и биомассы дрейссены в оз. Нарочь существенно не изменились.

Ключевые слова: *Dreissena polymorpha*; биотопическое распределение; плотность популяции; оз. Нарочь; погруженные макрофиты.

Благодарность. Авторы материала выражают благодарность дайверам международной категории В. В. Катulyко и А. А. Солдатенкову за неоценимый вклад в сбор полевого материала.

BIOTOPIC DISTRIBUTION OF INVASIVE SPECIES – *DREISSENA POLYMORPHA* (MOLLUSCA, BIVALVIA) IN LAKE NAROCH (BELARUS) IN 2016–2017

D. V. KRYUK^a, H. A. ZHUKAVA^a

^aBelarusian State University,
4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus
Corresponding author: D. V. Kryuk (KrukDV@bsu.by)

The study of the population of *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) in the Naroch Lake was carried out in 2016–2017. The distribution of the *Dreissena*'s population at different depths of Lake Naroch was examined at 9 transects. *Dreissena* was found in samples taken from 0.5 to 8 m depths and reached its maximum densities at depths of 2–6 m. As the result of the investigation, we found that the main substrate for the development of *Dreissena* in the lake are submerged macrophytes. The highest values of *Dreissena*'s abundance were observed in the samples, where *Chara* algae was the main substrate. This is probably due to the peculiarities of the charophyta development (incomplete dying off in winter), their morphology (strong branching of the thallus and, as a consequence, a large surface area for attaching of *dreissena*) and the fact that *Chara* algae are active carbonate precipitators (a rough surface of the thallus facilitates attachment to the plant). At the same time, the average mass of individuals of *Dreissena* developing on the bottom in near-shore zone was significantly greater than that of the individuals developing on macrophytes. After comparing the obtained data with the data of previous studies, it can be concluded that over the past two decades, the values of the weighted average density and biomass of *Dreissena* in Lake Naroch have not changed significantly.

Keywords: *Dreissena polymorpha*; biotopic distribution; population density; Naroch Lake; submerged macrophytes.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the divers of the international category V. V. Katulko and A. A. Soldatenkov for their contribution to the collection of field material.

Introduction

Dreissena polymorpha (Pallas) is a small invasive bivalve mollusk, capable of living at different depths of water bodies. Getting into suitable habitats, *Dreissena* quickly forms extremely dense settlements and often turns into the absolute dominant in benthic and periphytic communities both in terms of abundance and biomass. The active resettlement of *Dreissena* on the territory of Belarus took place at the end of the 20th century.

It has been shown that, getting into suitable water bodies, zebra mussel over several years becomes a driving factor in changing the habitats for native species. The influence of zebra mussel is primarily associated with its filtration type of nutrition, due to which this mollusk intercepts and deposits in its tissues a significant part of organic matter and nutrients, preventing their deposition and burial in bottom sediments [2; 3]. From a practical human point of view, the introduction of zebra mussel can be also positive. In particular, an improvement in water quality and, in some cases, an increase in the productivity of benthos-feeding fish. At the same time there are negative traits. For example, overgrowing underwater constructions and mass developing in pipelines leads to serious difficulties in water supply. In addition, the sharp edges of the shells at the bottom in littoral can create inconvenience for swimming people, and it is very noticeable for the reservoirs that are actively used for recreational purposes, such as, for example, Lake Naroch.

In Lake Naroch – the largest reservoir of the Republic of Belarus – *Dreissena* was first recorded in the late 1980s (according to other data, *Dreissena* was found in 1985–1986) [1; 4]. Regular hydrobiological studies carried out at Lake Naroch for over 60 years have made it possible to identify and describe quantitatively a number of consequences of the introduction of *Dreissena*, the main of which was the switching of matter and energy flows from planktonic communities to benthic and periphytic ones (while maintaining the same production level of the whole ecosystem). This process was named «bentification» [5; 6] or «contourization» [4] in the scientific literature.

The first estimates of the *Dreissena* population density after its introduction into Lake Naroch were carried out by A.Yu. Karataev and L.E. Burlakova [1; 2]. So, in 1990, *Dreissena* in Naroch was examined for the first

time only in the area of the confluence of the River Skema from the lake Myastro (which confirmed its entry into Naroch from above located Lake Myastro), the main substrate for it at that time were the shells of Unionids, submerged macrophytes and stones. In terms of the entire lake bottom area, the density and biomass of *Dreissena* in 1990 in Naroch were small and constituted 7.4 ± 3.0 ind./m² and 1.5 ± 0.6 g/m². However, in the next few years, as it is typical for many invasive species, there was an “explosive” increase in the population of zebra mussel, and by 1993 the population density of the mollusk in Naroch had increased by 103 times, and the biomass by 68 times, amounting 763 ± 149 ind./m² and 99 ± 30 g/m² on average for the lake. *Dreissena* by this time inhabited all suitable substrates, mainly developing on submerged macrophytes, and moved deeper into the lake up to 8 m. Since 1995, the total population of *Dreissena* in lake Naroch stabilized and, according to [2], remained the same until 2002. In 2005, according to the data of bottom grab samples in May and October, the weighted average values of *Dreissena*’s density and biomass in the lake were 1508 ± 221 ind./m² and 158.4 ± 17.9 g/m², respectively [7], which is also similar to the data obtained in the late 1990s – early 2000s.

Materials and methods

In June–August 2016 and June–September 2017 we estimated the density and biomass of *Dreissena* in Lake Naroch with the help of divers who used underwater photography and manual collection for sampling mollusks from macrophytes and bottom. This study, carried out after a rather long break in accordance with the scheme of previous years [2], made it possible to assess the current state of the *Dreissena* population in the lake and compare the obtained results with that of 20 years ago. In total, in 2016–2017 we examined 9 half-sections extending from the shore line to the maximum depths of submerged macrophytes distribution in the lake (fig. 1): transects 1–3 were located in the Small stretch of the lake, transects 4–9 were in the Large stretch.

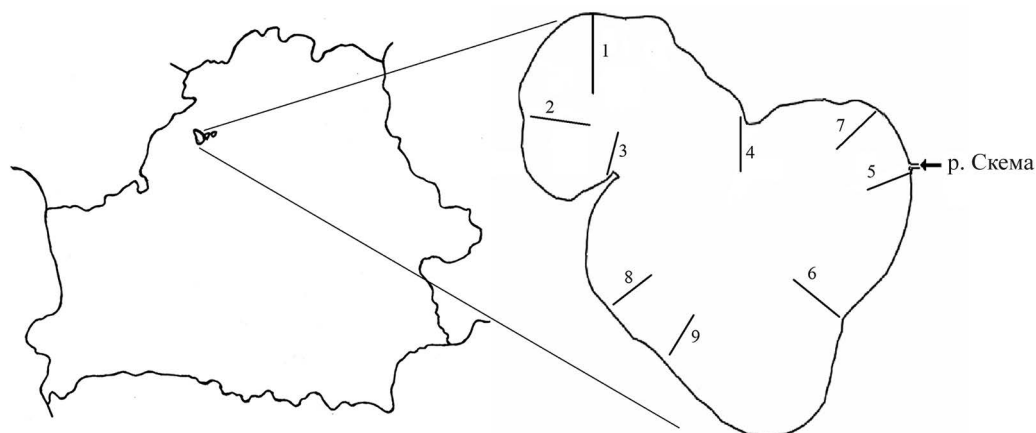


Fig. 1. The location of the Naroch lake on the map of Belarus and the layout of the transects along which the zebra mussel samples were taken in the lake Naroch in 2016–2017 (similar to those where *dreissena* was sampled in 1999–2002)

Dreissena and submerged macrophytes were collected manually using a 0.5×0.5 m frame (as shown in fig. 2) along the transects when submerging for each meter of depth or when plant associations were changing.



Fig. 2. Sampling of zebra mussel and accompanying samples of bottom sediments and macrophytes in Lake Naroch in 2016

Results and discussion

During the period of work in the summer months of 2016–2017 9 transects were examined. Transects were located along the periphery of the lake and covered depths in the range of 0.5–8 m (to the lower boundary of the submerged macrophytes distribution in the lake). The main results of the study of quantitative counts of *Dreissena*, as well as the description of soil type and submerged macrophytes (which are the substrate for the *Dreissena* attachment), are presented in table 1.

Table 1

Density of zebra mussel at different depths of the lake Naroch (weighted averages are presented)

Transect number (see fig. 1)	Sampling depth, m	Soil type of bottom	Macrophyte species	Number of collected frames (0.25 m ²)	<i>Dreissena polymorpha</i> density, ind./m ²	Biomass* <i>Dreissena polymorpha</i> , g/m ²
1	0.5–0.6	Silty sand	Chara, potamogeton	15	4	0.6
	0.8–1.0	Silty sand	Chara	3	1033	874.5
	1.9	Silty sand	Chara	1	1708	626.5
	2.5	Silty sand	Chara	1	5492	408.6
	3.0	Silty sand	Stratiotes, ceratophyllum, elodea	1	2892	726.0
	3.1	Silty sand	Chara, stratiotes	1	9716	479.4
	3.1	Silty sand	No macrophytes	1	0	0.1
	4.7	Silty sand	Chara	1	568	87.3
2	0.5	Sand	Chara, nitellopsis	10	147	93.9
	1.5	Sand	Chara	1	5680	416.3
	2.1	Silty sand	Elodea	1	364	78.4
	2.2	Silty sand	Chara, ceratophyllum, fontinalis	1	36	5.8
	2.2	Silty sand	Chara, stratiotes	1	168	25.7
	2.2	Silty sand	Chara	1	1332	108.8
	2.5	Silty sand	Potamogeton, ceratophyllum, elodea	1	1288	128.8
	3	Silty sand	Chara	1	1080	297.8
	4.7	Silty sand	Chara	1	2840	258.2
	5.5	Silty sand	Potamogeton, chara	1	376	60.9
	6.6	Silty sand	Elodea	1	652	87.4
3	0.5–0.8	Sand	No macrophytes	15	131	70.8
	0.5–0.8	Sand	Potamogeton	10	0	0.1
	1.6	Silty sand	Elodea, ceratophyllum	1	852	119.3
	1.8	Sand	Chara	1	336	150.6
	4.6	Silty sand	Chara	1	872	167.8
4	0.5	Sand and stones	Chara	3	149	21.6
	0.5	Sand and stones	No macrophytes	3	936	207.5
	1.6	Silty sand	Chara, ceratophyllum, fontinalis	1	4472	418.2
	1.7	Silty sand	Chara, elodea, fontinalis	1	1836	205.7
	2.1	Silty sand	Ceratophyllum	1	792	55.2
	2.4	Silty sand	Elodea	1	72	7.9
	3	Silty sand	Chara, elodea, ceratophyllum	1	984	159.5

Ending table 1

Transect number (see fig. 1)	Sampling depth, m	Soil type of bottom	Macrophyte species	Number of collected frames (0.25 m ²)	<i>Dreissena polymorpha</i> density, ind./m ²	Biomass* <i>Dreissena polymorpha</i> , g/m ²
5	0.4–0.6	Sand	No macrophytes	20	18	15.3
	0.4–0.6	Sand	Chara	1	144	37.2
	0.4–0.6	Sand	Chara	1	1452	507.6
	0.4–0.6	Sand	Potamogeton	3	7	0.9
	3.8	Silty sand	Chara, fontinalis	1	344	150.8
	4.5	Silty sand	Chara	1	1536	239.8
	7	Silty sand	Chara, potamogeton	1	428	86.8
	7.4	Silt	Chara	1	1052	43.6
6	0.5	Sand and stones	Chara	5	97	88.8
	0.5	Sand and stones	Chara	5	14	5.6
	2.0	Silty sand	Chara	1	3144	1155.6
	3.5	Silty sand	Chara	1	4792	824.6
	5.0	Silty sand	Chara	1	956	123.6
	7.5	Silty sand	Chara	1	252	53.2
7	0.4	Silty sand	Chara	20	0	0.1
	2.2	Silty sand	Potamogeton, chara, filamentous algae	1	304	282.0
	4.3	Silty sand	Chara, stratiotes	1	1572	390.2
	8.0	Silty sand	Nitellopsis, ceratophyllum	1	4	0.5
8	0.6–0.7	Sand	Chara	15	23	5.7
	3.0	Silty sand	Chara	1	1736	387.1
	4.0	Silty sand	Chara, potamogeton, elodea	1	2296	350.0
	5.5	Silty sand	Ceratophyllum, stratiotes, elodea, potamogeton, fontinalis	1	3352	424.6
	6.8	Silty sand	Ceratophyllum, elodea, potamogeton	1	136	27.2
9	0.5	Sand	Chara	10	44	21.1
	1	Sand	Chara	5	90	30.3
	3.0	Silty sand	Chara	1	676	82.3
	4.2	Silty sand	Chara, elodea, potamogeton	1	164	61.8
	5.4	Silty sand	Ceratophyllum, elodea	1	376	105.8
	6.3	Silty sand	Ceratophyllum, elodea	1	784	210.1
	8.0	Silt	Elodea, chara	1	748	87.7

Note. *Wet weight was measured after drying the zebra mussel on filter paper.

The results of the study showed that the main substrate for the development of *Dreissena* in the lake remain submerged macrophytes (as in was in the late 1990s – early 2000s), the densest thickets of which currently occupy depths from 2 to 6 m. Accordingly, in this range of depths the zebra mussel also reaches its maximum densities, like it has been noted earlier [1]. The distribution of spatial distribution of density and biomass at different depths is graphically depicted at the figures 3 and 4.

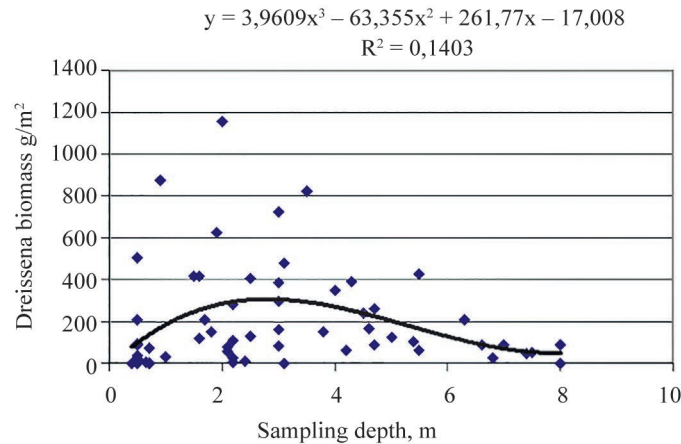


Fig. 3. Distribution of the zebra mussel biomass by depth in the Naroch lake in samples 2016–2017

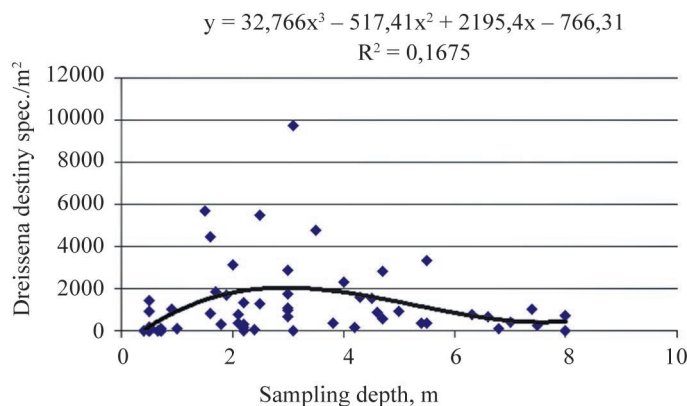


Fig. 4. Distribution of the zebra mussel density by depth in the Naroch lake in samples 2016–2017

The graphs show that there is no clear correlation between the abundance/biomass of *Dreissena* and depths of sampling. The maximum biomass values are within the depth values from 1 to 4 m, and the maximum density values from 1.5 m to 3.5 m. With increasing depth, the values of both parameters decrease. Probably, these results indirectly indicate the dependence of the *Dreissena* population on the intensity of the bottom overgrowth with macrophytes, which, in turn, is limited not only by the depth, but also by the type of soil, currents, etc. Moreover, at medium depths chara and ceratophyllum are more common, when at depths over 6–7 m elodea is more common (which is a less convenient substrate for attachment in comparison with chara algae, which mainly occupy shallower areas of the lake). The distribution of the zones of overgrowth with submerged macrophytes over the various depths of the lake are presented in more details in [8]. In the presence of a suitable plant substrate (chara algae), mollusks can be found in a fairly large number also at depths over 6 m.

Due to the fact that different types of submerged macrophytes in the lake have different ratios of surface area to mass and their own morphological features, the relationship between the air-dry mass of macrophytes and the abundance/biomass of *dreissena* collected from the same site has not been revealed. According to Spearman's rank correlation analysis the data on the biomass of *dreissena* didn't show dependence with air-dry mass of macrophytes ($n = 36$, $r = -0.028$), as well as for the abundance of *dreissena* and air-dry mass of macrophytes ($n = 36$, $r = 0.063$). It was noted that the most favorable substrate for the development of *Dreissena* in Lake Naroch is chara algae, since their morphological structure and features of the life cycle allow *dreissena* to fix successfully on the thallus in large numbers. First of all, this is facilitated by the strong branching of the thallus and, as a consequence, a large surface area for attachment, as well as the fact that chara algae are active carbonate precipitators (a rough surface facilitates attachment to the plant). Also chara thallus shows the incomplete dying off in winter (and due

to calcification of cell membranes, even dying parts of the thallus decompose more slowly), which allows zebra mussel to develop on chara algae for more than one vegetative season [9].

Also it has been shown that dreissena individuals that develop at shallow depths on sandy soil (usually they form drusen or attach to stones and snags) have a higher specific weight in comparison with that developing on macrophytes. This is mainly due to the seasonal development of most water plants, which also leads to dying off the mollusks attached to them in winter when they submerge in silt at the bottom. Therefore, for samples collected in 2016–2017 on macrophytes, the average weight of one zebra mussel ($\pm$ standard error of the mean) turned out to be significantly less than that for mollusks collected in shallow water on a sandy substrate (0.24 ± 0.02 and 0.80 ± 0.05 g, respectively). Differences between the individual weights of individuals found on the two substrates were highly significant (Mann-Whitney U-test, $p = 0.0003$, $n = 15$). The similar situation was observed in the lake earlier: the average weight of mollusks on macrophytes in 1993–1995 and 1997 was equal to 0.07 ± 0.01 and 0.10 ± 0.01 g, and on a sandy substrate – 0.35 ± 0.07 and 0.3 ± 0.05 g respectively (calculated based on the archival data of L. E. Burlakova).

The collected data from 9 investigated transects where superimposed on the bathymetry of the lake and the weighted average values of the density and biomass of Dreissena in the lake were calculated. Data of the present study were compared with the data of previous. The results are shown in table 2.

Table 2

Long-term dynamics of the *Dreissena polymorpha* population in Lake Naroch

Years of research	Number of observations (sample size)	Density, sp./m ²	Biomass, g/m ²	Source
1990	54	7.4 ± 3	1.5 ± 0.6	[2]
1993	49	763 ± 149	99 ± 30	
1994	126	758 ± 240	115 ± 30	
1995	116	1521 ± 451	107 ± 44	
1997	285	922 ± 238	99 ± 20	
2002*	37	757 ± 198	256 ± 78	Archival data of L. E. Burlakova
2005**	177	1508 ± 221	158 ± 18	[7]
2016–2017	188	1202 ± 128	199 ± 18	Our data

Note. *Samples were taken at depths up to 2 m; **according to bottom grab samples.

The data obtained in 1995–1997 are the most comparable with the data of our study, because they were sampled according to the same scheme. Other data can be considered as indicative, since the number of collected samples and the depth of their sampling varied. So, in 2002, zebra mussel samples were collected only in shallow areas of the littoral zone, mainly on sandy soil, which led to lower average density values with a higher biomass; in 2005, bottom areas were examined at depths from 0.8 to 8 m using a bottom grab [7].

If we compare our data with the data of previous studies, especially paying attention to that in 1995 and 1997 when the population of Dreissena in Lake Naroch reached a plateau and the research scheme was the same, it can be concluded that over the past two decades, the mean values of dreissena's density and biomass in the lake had not changed significantly.

Conclusion

In 2016–2017 after almost 20 years break, a large survey of the lake Naroch was carried out in order to assess the population density and spatial distribution of Dreissena polymorpha. It had been shown that the main substrate for the development of dreissena in the lake remain submerged macrophytes, mainly chara algae, which develop mostly in the depth range 2–6 m. Our results indicate that in recent 20 years the population of Dreissena in Lake Naroch is in a stationary state, keeping the values of the weighted averages of density and biomass close to those observed at the end of the 1990s. Dreissena on submerged macrophytes in the lake is mainly represented by annual individuals that die when macrophytes die off in winter. The part of the population located in shallow water area is represented by mollusks of different ages (this is confirmed by the higher values of individual weight and size characteristics of individuals), which form a reproductive reserve for the population in the lake ecosystem that ensures the colonization of a new generations of zebra mussels on submerged macrophytes in the next growing season.

References

1. Burlakova LE. Ecology of *Dreissena polymorpha* (Pallas) and its role in the structure and functioning of aquatic ecosystems. [PhD thesis]. Minsk: Institute of Zoology of the National Academy of Sciences of Belarus; 1998. 18 p. Russian.
2. Burlakova LE, Karatayev AY, Padilla DK. Changes in the distribution and abundance of *Dreissena polymorpha* within lakes through time. *Hydrobiologia*. 2006;571:133–146.

3. Zhukova TV. The role of *Dreissena* (*Dreissena polymorpha* Pallas) in the functioning of the Naroch lakes (review). In: Krylov AV, Pryanichnikov EG, editorial count. *Dreissenids: evolution, systematics, ecology: lectures and materials of reports of the II International School-Conference*. Institute of Biology of Inland Waters. I. D. Papanina (2013 November 11–15,). Yaroslavl: Chancellor; 2013. p. 55–59. Russian.
4. Protasov AA. Conceptual Models of the Contourization Processes in the Aquatic Ecosystems. *Hydrobiological Journal*. 2014;50(1):3–19.
5. Zhu B, Fitzgerald DM, Mayer CM, et al. Alteration of ecosystem function by zebra mussels in Oneida Lake. NY: impacts on submerged macrophytes. *Ecosystems*. 2006;9:1–12.
6. Ostapenya AP, Zhukova TV, Mikheeva TM, Kovalevskaya RZ, et al. Lake ecosystem bentification: causes, mechanisms, possible consequences, research prospects. In: *Proceedings of BSU*. 2012. Volume 7. Part 1. p. 135–148. Russian.
7. Mastitsky SE, Veres YK, Nayarovich OA, Kondobarov SYu. The role of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*) in the structure of the malacological complex of Lake Naroch. In: *Proceedings of the 6th International scientific conference Sakharov Readings 2006: Environmental Problems of the XXI Century*, 2006 May 18–19, Minsk, Republic of Belarus. Minsk: Moscow State University of Economics; 2006. Part 1. p. 322–324. Russian.
8. Zhukova AA, Zhukova TV, Makarevich OA, Ostapenya AP. The role of semi-submerged macrophytes in the functioning of the Narochanskies lakes. In: Pilipenko VN, Kosobokova SR, editors. *Ecology of biosystems: problems of study, indication and forecasting. Materials II International scientific-practical conference*, Astrakhan, 2009 August 25–30. Astrakhan: Publishing House Astrakhan University; 2009. p. 295–299. Russian.
9. Vinberg GG, editor. *Ecological system of the Narochanskies lakes*. Minsk: Universitetskoe Publishing House; 1985. 303 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 08.11.2021.
Received by editorial board 08.11.2021.

УДК 595:[574.21+574.24]

ЖИЗНЕННЫЕ ФОРМЫ ПРЯМОКРЫЛЫХ (ORTHOPTERA) БЕЛАРУСИ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ИХ АДАПТИВНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И БИОИНДИКАЦИОННЫХ КАЧЕСТВ

Т. П. СЕРГЕЕВА¹⁾, О. В. ЛОЗИНСКАЯ¹⁾, Е. Г. СМЕРНОВА¹⁾

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

Анализируются литературные данные о жизненных формах прямокрылых (Orthoptera) и приводятся результаты авторских исследований. Отмечается вклад представителей разных школ в изучение жизненных форм насекомых, в частности, прямокрылых. Подчеркивается, что учение о жизненных формах и об экологических фаунистических комплексах, является важным направлением в экологии. Указывается, что жизненные формы достаточно точно характеризуют особенности условий обитания организмов благодаря экологической пластичности (в том числе эври- и стенобиотности), являющейся отражением их адаптационного потенциала. Установлена принадлежность всех обнаруженных для территории Беларуси видов прямокрылых к определенным жизненным формам и изучен их набор, представленный 16-ю группами, входящими в 2 класса: фитофилов и геофилов – по 8 жизненных форм в каждой. Отмечено, что большинство Orthoptera Беларуси относятся к классу фитофилов (34 вида), который включает: злаковых (настоящих), осоково-злаковых, специализированных, травоядных и факультативных хортобионтов, а также тамнобионтов, микротамнобионтов и специализированных тамнобионтов. Класс геофилов значительно уступает по числу входящих в него видов – 19. К нему принадлежат открытые и подпокровные геофилы, герпетобионты, эремобионты, норные, землерои, мирмекофилы и активные фиссуробионты. Отдельного внимания заслуживает редкий на всем ареале его распространения стенобионтный гигрофильный вид – *Chrysochraon dispar* Germ., сочетающий уникальные особенности, затрагивающие экологическую, фенологическую и мофологическую структуру популяций. Показано, что этот вид является индикатором условий среды и обладает широкими адаптивными возможностями, проявляющимися в способности к сдвигу фенологических фаз и смене стадий, – явлению, получившем определение экологического или биологического принципа смены стадий Г. Я. Бей-Биенко. Дана сравнительная характеристика жизненных форм прямокрылых 6 заповедников лесных зон Восточной Европы и Дальнего Востока России, показавшая, что набор их жизненных форм в локальных фаунах практически идентичен. Отличия сводятся к изменению доли тех или иных форм в фаунах конкретных заповедников. Полученные данные об особенностях прямокрылых, выраженных в структурной организации их сообществ и наборе жизненных форм, специфических для разнотипных мест обитания, позволяют считать эту группу насекомых пригодной для биоиндикационной оценки среды и экологического мониторинга.

Ключевые слова: регион; насекомые; прямокрылые; жизненные формы; габитус; адаптации; местообитания; биоиндикаторы.

Благодарность. Исследования поддержаны грантом Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Б17-143), а также Государственной программой научных исследований «Химические технологии и материалы, природно-ресурсный потенциал». Задание 13/14.

Образец цитирования:

Сергеева ТП, Лозинская ОВ, Смирнова ЕГ. Жизненные формы прямокрылых (Orthoptera) Беларуси как показатель их адаптивных возможностей и биоиндикационных качеств. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2021;4:36–45.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-36-45>

For citation:

Sergeeva TP, Lozinskaya OV, Smirnova EG. Life forms of Orthoptera Belarus as an indicator of their adaptive capabilities and bioindicative qualities. Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2021;4:36–45. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-36-45>

Авторы:

Татьяна Павловна Сергеева – ведущий научный сотрудник НИС.

Ольга Владиславовна Лозинская – старший преподаватель кафедры общей биологии и генетики.

Елена Геннадьевна Смирнова – старший преподаватель кафедры общей биологии и генетики.

Authors:

Tatyana P. Sergeeva, leading researcher of the research sector.
sergeeva.t57@gmail.com

Olga V. Lozinskaya, senior lecturer at the department of general biology and genetic.
aromia@rambler.ru

Elena G. Smirnova, senior lecturer at the department of general biology and genetic.
e.smirnova@tut.by

LIFE FORMS OF ORTHOPTERA BELARUS AS AN INDICATOR OF THEIR ADAPTIVE CAPABILITIES AND BIOINDICATIVE QUALITIES

T. P. SERGEEVA^a, O. V. LOZINSKAYA^a, E. G. SMIRNOVA^a

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

Corresponding author: T. P. Sergeeva (sergeeva.t57@gmail.com)

The literature data on the life forms of Orthoptera are analyzed, and the results of own research are presented. The contribution of the representatives of different scientific schools to the study of the life forms of insects, in particular, Orthoptera, is characterized. It is emphasized that the doctrine on life forms, along with the doctrine on ecological faunal complexes, is an important area in ecology. It is noted that life forms characterize sufficiently precise the features of the living conditions of organisms due to ecological plasticity (including eury- and stenotopy), which is a reflection of their adaptive potential. The affiliation of all Orthoptera species found on the territory of Belarus to a certain life form has been established, their set has been studied. Spectrum has been compiled: it is represented by 16 groups belonging to two classes: phytophiles and geophiles (8 life forms in each). It is noted that most Orthoptera of Belarus belong to the class of phytophiles (34), which includes hortobionts: cereal (real), sedge-cereal, specialized, herbivorous and facultative; as well as tamnobionts, microtamnobiontes and specialized tamnobionts. The class of geophiles (19), but it significantly inferior in the number of constituent species. It includes open and subcover geophiles, herpetobionts, burrowing, ground-moving, eremobiontes, myrmecophiles and active fissurobionts. A rare stenobiont hygrophilous species – *Chrysochraon dispar* (Germ.) deserves special attention throughout its distribution area. It combines unique features that influence the ecological, phenetic and morphological structure of populations. The data obtained on the Orthoptera properties, which are manifested in the structural organization of their communities and a set of life forms specific to different habitats, allow us to consider this group of insects usable for environmental bioindicator assessment and ecological monitoring.

Keywords: region; Insecta; Orthoptera; life forms; habitus; adaptations; habitats; bioindicators.

Acknowledgments. This study was supported by the Belarussian Republic Foundation For Fundamental Research (grant B17-143) and Belorussian state scientific research program «Chemical technologies and materials, natural resource potential». Task 13/14.

Введение

Одним из приоритетных направлений экологии является учение о жизненных формах (ЖФ) как более точных индикаторах условий обитания в ландшафте, а также их теоретической и практической значимости, чему и посвящена данная работа. Планомерные исследования прямокрылых (Orthoptera), проведенные на территории Беларуси с 1970-х гг., а также продолжающиеся по настоящее время, позволили всесторонне изучить эту важную в хозяйственном и биоценотическом аспекте группу насекомых.

Целью исследования явилось изучение жизненных форм прямокрылых (Orthoptera) Беларуси в двух подтипах ландшафтов, включающих как заповедные территории (Березинский государственный биосферный заповедник, Национальный парк «Припятский»), отражающие флору и фауну регионов, так и территории, трансформированные в процессе хозяйственного освоения.

Первоочередной задачей было установление жизненных форм прямокрылых, обитающих в разнотипных биотопах, характерных для данного региона, а также выявление особенностей их спектров в идентичных ландшафтах северной и южной частей Беларуси.

Классики энтомологии минувшего века констатировали, что жизненные формы насекомых, в частности, прямокрылых позволяют всесторонне оценить экологические фаунистические комплексы, так как отражают «главнейшие особенности обитания организмов» [1]. А «внешний облик (габитус) животного в сочетании с его биологическими адаптациями» [2], проявляющимися и посредством полового диморфизма [3], играют важную роль в адаптационных стратегиях. Габитуальные различия служат также критерием для выделения у прямокрылых (Orthoptera) жизненных форм, или морфо-адаптационных типов [4].

Значимость жизненных форм различных систематических групп насекомых в экологических исследованиях подчеркивалась представителями разных школ. По мнению И. Х. Шаровой [5], жизненные формы можно использовать для описания экологического распределения, а также установления степени экологической пластичности, являющейся отражением их адаптационного потенциала. Кроме того, она считала, что характер взаимоотношения организма со средой определяет направление эволюционного процесса и сопровождается выработкой разнообразных приспособлений организма к конкретным условиям его существования. Проблему изучения жизненных форм Д. А. Криволуцкий [6] охарактеризовал, как ведущей в современной экологии, а использование анализа жизненных форм – как одну из возможностей решать эволюционные и практические

вопросы. Роль жизненных форм насекомых в качестве критерия при отборе видов-индикаторов для экологического мониторинга показана на примере жужелиц [7]. Кроме того, отмечалось, что жизненная форма как звено биогеохимического круговорота характеризует и биоценотические структуры [8]. Жизненные формы используются также при описании экологического распределения, а степень экологической пластичности (в том числе эври- и стенотопности) является отражением их адаптационного потенциала. Изучить же более полную систему «биотоп – прямокрылые» возможно с помощью жизненных форм, являющихся «результатом действия естественного отбора в определенных условиях среды, выраженного во внешнем облике животного» [9].

Создателем классификации жизненных форм прямокрылых является один из классиков энтомологии – Г. Я. Бей-Биенко, которому принадлежат наиболее важные работы в этой области [10–12]. Вклад в данную проблему внесли также Б. П. Уваров и С. Ю. Стороженко, давший описание жизненных форм прямокрылых (длинноусых и короткоусых) Дальнего Востока, в том числе Хинганского заповедника, а также азиатской части России, и А. В. Горохов, которым были изучены жизненные формы сверчков [4; 13–18].

Г. Я. Бей-Биенко, отмечал, что среди жизненных форм прямокрылых лесной зоны преобладают представители класса фитофилов – хортобионты, обитающие в травостое [12]. Представители же другого класса – открытые геофилы – держатся в лесной зоне песчаных или каменистых участков и в большинстве своем являются реликтами ксеротермических периодов, в течение которых сухолюбивая и теплолюбивая степная фауна оказалась далеко продвинутой на север и в последующем частично здесь сохранилась на наиболее теплых и прогреваемых участках.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились в различных районах и областях Беларуси в двух подтипах ландшафтов: подтаежном (смешанно-лесном) и полесском (широколиственно-лесном). Стационарные наблюдения выполнены на территории Березинского биосферного и Припятского ландшафтно-гидрологического (ныне Национальный парк «Припятский») заповедников, биоценозы которых в значительной мере отражают структуру двух крупных лесорастительных подзон севера и юга региона и служат эталонами состояния их растительного и животного мира. Изучали прямокрылых поймы Березины, Припяти, Днепра и их притоков – Западной Двины и Плисы.

Материалом послужили сборы прямокрылых в экологически различающихся биогеоценозах, расположенных в естественной или техногенно измененной среде: гигрофитных (болота, пойменные луга) и ксерофитных (лесные поляны и опушки, суходольные луга, агроценозы), а также рудеральных биотопах. В результате выполненной работы в подтаежном ландшафте собрано свыше 30 тыс. экземпляров прямокрылых и в полесском ландшафте – более 40 тыс. экземпляров.

Выявление видового состава прямокрылых насекомых проводили стандартными методами по общепринятым методикам. На стационарных площадках, расположенных в биотопах, максимально отражающих структуру конкретной лесорастительной подзоны, проводили сборы прямокрылых методом кошения, используя стандартный энтомологический сачок [19]. Помимо кошений, осуществляли отряхивание кустарников и ручной сбор для кузнечиков и сверчков.

Жизненные формы прямокрылых насекомых устанавливали по системам классификации, разработанным Г. Я. Бей-Биенко, А. В. Гороховым; Ф. Н. Правдиным; С. Ю. Стороженко и Б. П. Уваровым, [2; 4; 9; 12–14; 16–18], основанным на морфо-метрических показателях и различиях габитуса: углу наклона головы, длине и толщине усиков, соотношении между шириной и высотой тела в области заднегруди (индекс Ш/В) – меньше или больше 1; обтекаемости и окраске тела, гигро- и термопреферендуме, а также с учетом морфо-экологических характеристик [20] и степени специализации семейства саранчовых с помощью морфологических структур [21].

Отнесение каждого вида к определенной жизненной форме проводилось на основе его многократных находок в типичных условиях микроландшафта и микростадий в пределах Беларуси (за исключением редких видов).

Результаты исследования и их обсуждение

Планомерные исследования прямокрылых (Orthoptera), проведенные на территории Беларуси с 1970-х гг., а также продолжающиеся по настоящее время, позволили всесторонне изучить эту важную в хозяйственном и биоценотическом аспекте группу насекомых. Все обнаруженные для территории Беларуси виды прямокрылых (53) были проанализированы и ранжированы по жизненным формам соответственно системе Г. Я. Бей-Биенко с позиций представлений Д. А. Кривоуцкого о жизненных формах животных и учетом морфо-экологических адаптаций насекомых в сообществах [9; 12; 22]. Основой для составления спектра жизненных форм прямокрылых Беларуси [23] послужила работа Ф. Н. Правдина и др., в которой спектр охарактеризован «набором жизненных форм и числом видов, которым представлена каждая жизненная форма в составе региональной фауны или в экологической группировке соответственно строению их тела, поведению и экологии» [24].

Результаты изучения жизненных форм Беларуси даны в табл. 1.

Таблица 1

Жизненные формы прямокрылых Беларуси

Table 1

Life forms of Orthoptera of Belarus

Семейства	Жизненные формы															
	Фитофилы								Геофилы							
	ЗХ	ОЗХ	СХ	ТХ	ФХ	ТБ	МТ	СТ	ОГ	ПГ	ГБ	НР	РГ	ЭБ	ПБ	ФБ
Tettigoniidae	2	1	2		1	2	2	1		1						
Gryllotalpidae												1	1			
Myrmecophilidae												1				
Tetrigidae											5					
Acrididae	15		1	1	6				3	3				1	1	
Gryllidae												1				1
Всего видов	17	1	3	1	7	2	2	2	3	5	5	3	1	1	1	1

Примечание. Условные обозначения жизненных форм (ЖФ): *Класс фитофилы*: ЗХ – злаковые хортобионты; ОЗХ – осоково-злаковые хортобионты; СХ – специализированные хортобионты; ТХ – травядные хортобионты; ФХ – факультативные хортобионты; ТБ – тамнобионты; МТ – микротамнобионты; СТ – специализированные тамнобионты; *Класс геофилы*: ОГ – открытые геофилы; ПГ – подпокровные геофилы; ГБ – герпетобионты; НР – норные; РГ – роющие геофилы; ЭБ – эремобионты; ПБ – петробионты; ФБ – фиссуробионты.

Как следует из табл. 1, спектр жизненных форм Беларуси представлен 16-ю группами, составляющими 2 класса: фитофилов (34 вида) и геофилов (19 видов), в которые входит по 8 жизненных форм. Различаются эти классы в качественном и количественном отношении, поскольку наборы их ЖФ не одинаковы в таксономическом плане и по числу видов.

Большинство прямокрылых спектра ЖФ относятся к злаковым хортобионтам – 17 видов, два из которых относятся к семейству Tettigoniidae, а 15 к семейству Acrididae. Значительно беднее по числу видов факультативные хортобионты (7): 1 из семейства Tettigoniidae и 6 – из семейства Acrididae; герпетобионты – 5 видов; подпокровные геофилы; специализированные хортобионты и открытые геофилы содержат по 3 вида; микро- и тамнобионты представлены 2-мя; а осоково-злаковые и травядные хортобионты, специализированные тамнобионты, роющие геофилы, норные, эремобионты, петробионты и фиссуробионты – всего по 1-ому виду.

В класс геофилов входят виды, экологически и морфологически отличающиеся от видов, составляющих класс фитофилов.

К открытым геофилам относятся 3 представителя семейства Acrididae; в группу подпокровных геофилов входят один вид из семейства Tettigoniidae и три – из семейства Acrididae. Все представители герпетобионтов (5 видов) относятся к одному семейству прямокрылых (Tetrigidae) самому древнему из этого отряда. Норные и роющие геофилы представлены семействами Gryllidae, Gryllotalpidae и Myrmecophilidae и включают 2, 1 и 1 вида соответственно. И, наконец, активные фиссуробионты – это всем известный домовый сверчок – *Acheta domesticus* L.

Таким образом, жизненные формы Tettigoniidae, как и Acrididae, довольно разнообразны. Значительно беднее жизненные формы у сверчков: сверчки-геофилы из семейства Gryllidae относятся к активным фиссуробионтам, сверчки-геобионты являются норниками, а сверчок муравьелюб из семейства Myrmecophilidae – типичный представитель жизненной формы симбионтов.

Наши результаты соответствуют полученным Г. Я. Бей-Биенко [12] для прямокрылых лесной зоны, где наибольшего развития достигают обитатели растений (фитофилы), а среди них – обитатели травостоя (хортобионты), на долю которых приходится не менее 50 % этих насекомых, представленных преимущественно Acrididae.

По нашим данным среди прямокрылых-фитофилов Беларуси на долю обитателей травостоя (хортобионтов) приходится почти 54,7 %, а на долю обитателей деревьев и кустарников (тамнобионты) – около 9,4 % прямокрылых Беларуси. В этой группе доминируют Tettigoniidae. В целом фитофилы составляют более 64 % выявленных нами прямокрылых.

К обитателям поверхности почвы (геофилам) относится значительно меньшая часть Orthoptera (около 36 %), среди которых доминируют герпетобионты (9,4 %) и подпокровные геофилы (7,5 %). Доля норных, а также открытых геофилов, обитающих на песчаных, хорошо прогреваемых участках и, по определению Г. Я. Бей-Биенко, являющихся реликтами ксеротермических периодов [12] – одинаковая (по 5,7 %). Остальные жизненные формы представлены по 1-ому виду и составляют небольшую часть в спектре жизненных форм.

В составе прямокрылых Беларуси есть два представителя жизненной формы симбионтов (сверчок-муравьелюб) – *Myrmecophilus acervorum* и домовый сверчок *Achela domesticus*.

Особого внимания заслуживает представитель класса фитофилов, являющийся специализированным хортобионтом, зеленчук непарный – *Chrysochraon dispar* – редкий и малочисленный вид на протяжении всего ареала своего распространения. Встречается локально. Обитает на сырых лугах и болотах.

Следует отметить, что зеленчук непарный сочетает в себе уникальные особенности, которые затрагивают экологическую, фенетическую и морфологическую структуру популяций. Так, ему свойственен половой диморфизм, проявляющийся в отличии морфометрических и других признаков на половом уровне, что продемонстрировано на рис. 1.

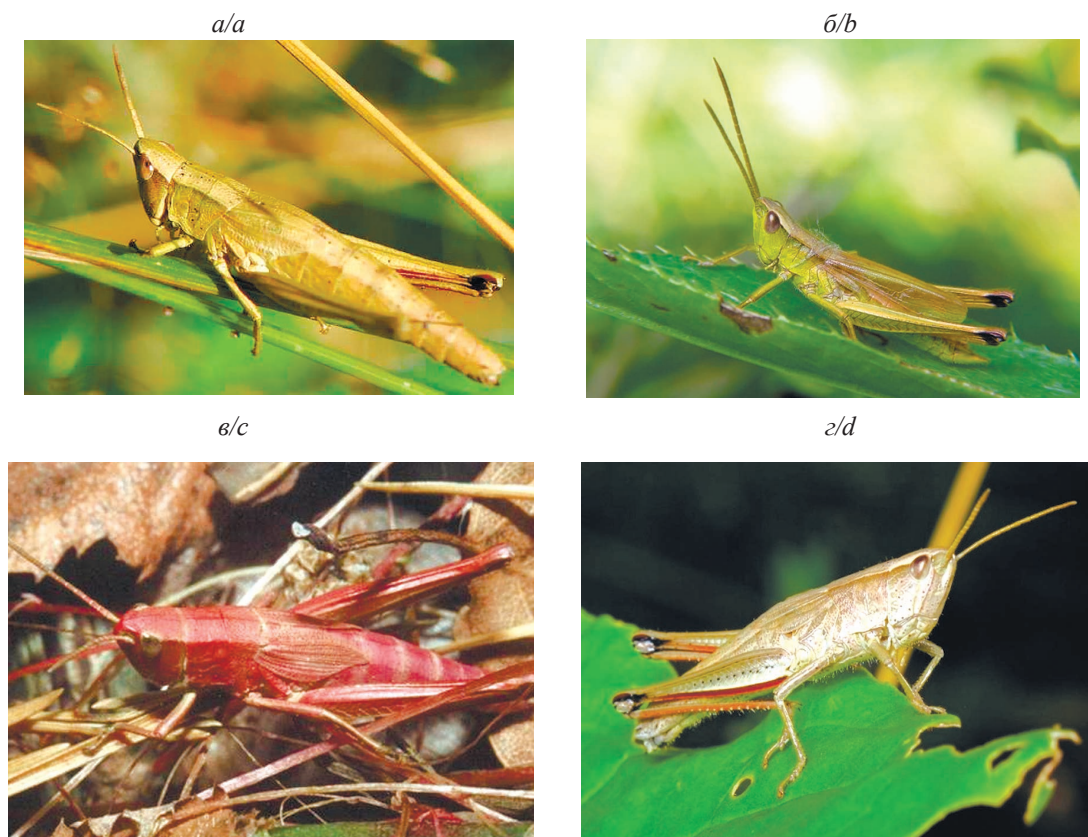


Рис. 1. Половой диморфизм *Chrysochraon dispar* Germ.: самка (а) и самец (б).

Проявление полиморфизма в окраске самок *Chrysochraon dispar* в зависимости от условий среды (а, в, г) [www.freenatureimages.eu]

Fig. 1. Sexual dimorphism of *Chrysochraon dispar* Germ.: female (a) and male (b). Polymorphism in the coloration of *Chrysochraon dispar* females is depending on environmental conditions (a, c, d) [www.freenatureimages.eu]

Как следует из рис. 1, а, самки крупные, их крылья слабо развиты, окрашены в розоватый или металлический серо-бежевый цвет, значительно реже – светло-зеленые (рис. 1, а, в, г), что является проявлением нормы реакции; самцы же значительно мельче самок, окрашены в изумрудно-зеленый цвет и имеют хорошо развитые крылья.

Кроме того, в отличие от большинства саранчовых, длиннокрылых на стадии имаго, половозрелые самки *Chrysochraon dispar* короткокрылы. Однако в редчайших случаях у них отмечается и длиннокрылость. Так, находка длиннокрылой самки (f. macroptera) в мае месяце на разнотравном лугу в абсолютно-заповедной зоне (урочище «Пострежье») свидетельствует о сдвиге фенологических фаз и смене стадий, что отмечено также для Польши [25].

Широта нормы реакции этого вида проявляется также в варьировании окраски тела самок из географически разобщенных популяций, что отражено на рис. 1. Светло-зеленый окрас – у особей самых влажных участков абсолютно-заповедной зоны Березинского биосферного заповедника (урочище «Савский Бор») и гигрофильного луга поймы Днепра (Хороброво, Оршанский р-н), но серебристо-бежевый и сиреневато-розовый – у особей популяций пойменного луга р. Хвощевки (окрестности Толочина), вблизи которого находится ремонтно-тракторная станция, хлебозавод, маслозавод и крахмальный. Приспособительная окраска тела свойственна также и другим видам Orthoptera, одним из которых является конек луговой – *Chorthippus dorsatus* Zett. (рис. 2).



Рис. 2. Конек луговой – *Chorthippus dorsatus* Zett

Fig. 2. Steppe grasshopper – *Chorthippus dorsatus* Zett

Из рис. 2 следует, что особи конька лугового, обитающие в гигрофильных условиях, окрашены в зеленый цвет (рис. 2, а), а в ксерофильных – в бурые (рис. 2, б) тона.

Из наших наблюдений вытекает, что особи географически разобщенных популяций, встречающиеся в сходных экологических условиях (заповедных или приближенных к таковым), имеют зеленую окраску, то есть были идентичны по этому признаку, а у популяций, оказавшихся в условиях антропогенного воздействия, обладают иной окраской.

Подчеркивается, что диапазон варьирования одного из полиморфных признаков (окраски самок) достаточно широк и служит индикатором условий среды – естественной или испытывающей антропогенное влияние.

Таким образом, этот вид, являясь редким по встречаемости, а также индикатором высокой влажности, представляет интерес с точки зрения обладания широкими адаптивными возможностями, проявляющимися также в способности к сдвигу фенологических фаз и смене стадий, явлению, получившем определение экологического или биологического принципа смены стадий Г. Я. Бей-Биенко [26; 27].

Результаты анализа жизненных форм сообществ прямокрылых разнотипных биогеоценозов подтаежного ландшафта, включая естественные и антропогенно измененные, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Спектр жизненных форм сообществ прямокрылых подзоны дубово-темнохвойных лесов

Table 2

The spectrum of life forms of Orthoptera communities of the subzone of oak-dark coniferous forests

Биотопы	Фитофилы						Геофилы			
	ЗХ	ОЗХ	ТХ	СХ	ФХ	Т	ОГ	ПГ	ГБ	РГ
Пойменные луга	+	+	+	+	+				+	
Суходольные луга	+				+		+	+	+	
Посевы тимофеевки	+				+				+	
Посевы ежи сборной	+								+	
Поля	+				+				+	+
Сосняки	+				+	+	+	+	+	

Из табл. 2 следует, что большинство прямокрылых подтаежного ландшафта относится к фитофилам, а именно к злаковым и факультативным хортобионтам, заселяющим все исследованные биотопы. Лишь немногие предпочитают осоково-злаковые ассоциации, являются специализированными хортобионтами или тамнобионтами. Меньшая часть приходится на долю геофилов, из которых наиболее распространены герпетобионты, в значительно меньшей степени и в порядке убывания подпокровные, открытые геофилы и землерои. Наиболее разнообразен спектр жизненных форм группировок пойменных и суходольных лугов, а также в сосняках; сужается на полях и посевах кормовых трав.

Все вышеизложенное позволяет судить о том, что каждый из обследованных биотопов отличается своеобразием условий и характеризуется свойственным только ему населением прямокрылых. Выявленные группировки различаются фенологически, отношением к влажности и температуре, что сказывается на их качественной и количественной структуре и обладают характерным набором жизненных форм.

Результаты анализа жизненных форм сообществ прямокрылых разнотипных биогеоценозов полесского ландшафта, включая естественные и антропогенно измененные, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Спектр жизненных форм прямокрылых естественных и трансформированных биотопов поймы Припяти

Table 3

The spectrum of life forms of orthoptera in natural and transformed biotopes of the Pripjat floodplain

Биотопы	ЗХ	ОЗХ	ТБ	ФХ	ГБ	ПГ	ОГ	НР
Пойменные луга	+	+	+	+	+	+		
Осушенные луга	+		+	+	+	+	+	+
Выпасы	+		+	+	+	+		
Посевы тимофеевки	+			+	+			
Посевы ежи сборной	+	+			+			

Из табл. 3 следует, что в естественных, а также осушенных и используемых под сельхозугодья биотопах поймы Припяти наблюдается такая же закономерность участия жизненных форм, как и в подтаежном: наибольшее разнообразие характерно для естественных биогеоценозов (пойменные и осушенные луга) и заметно беднее оно на трансформированной территории – посевах кормовых трав.

Анализ ЖФ северной и южной частей Беларуси показал, что их наборы отражают условия среды: в обоих ландшафтах спектр более разнообразен в естественной среде – на влажных и сухих лугах, а также в сосняках и сужается в антропогенно измененной среде. Установлено, что из 16 жизненных форм 14 являются общими для обследованных территорий северной и южной частей Беларуси, и только две из них – специализированные хортобионты (*Chrysochraon dispar*) характерны для севера, а открытые геофилы (*Gomphocerippus rufus*, *Celes variabilis*, *Sphingonotus coerulans*) – для юга Беларуси.

Все вышеизложенное позволяет судить, что каждый из обследованных биотопов отличается своеобразием условий и характеризуется свойственным только ему населением прямокрылых, различающимся фенологически, гигро- и термопреферендумом, а также набором жизненных форм и наличием видов-индикаторов условий среды.

Население прямокрылых было проанализировано также с точки зрения распределения их жизненных форм по широтным группам ареалов, в соответствии с унифицированной системой широтных ареалов, разработанной М. Г. Сергеевым [28] (табл. 4).

Таблица 4

Распределение жизненных форм прямокрылых Беларуси по широтным группам ареалов

Table 4

Distribution of life forms of Orthoptera in Belarus by latitudinal range groups

Широтная группа ареалов	ЗХ	ОЗХ	СХ	ТХ	ФХ	ТБ	МТ	СТ	ОГ	ПГ	ГБ	НР	РГ	ПБ	ЭБ	ФБ
Лесная	1		1		1						1					
Лесо-лесостепная	6	2		1	2	2	2	1		1	3				1	
Поли-зональная	4				2					1	1		1			1
Южно-лесная			1					1								
Северо-степная	4															
Степная	1				1				1			2				
Южно-степная	1				1				2	2				1		

В табл. 4 представлены данные о распределении жизненных форм прямокрылых Беларуси по широтным группам ареалов. Таким образом, наибольшим разнообразием жизненных форм отличаются прямокрылые лесо-лесостепной и полизональной групп широтных ареалов, затем следуют степная, южно-степная и лесная. Однообразием отличается северо-степная группа, представленная только злаковыми хортобионтами. Спектр жизненных форм каждой группы широтных ареалов отражает экологическую приверженность видов, а в целом – среду их обитания в совокупности с климатическими факторами.

Интерес для изучения энтомофауны, в частности прямокрылых, представляют заповедные территории, особая значимость которых определяется уникальностью их природных комплексов как эталонов

состояния растительного и животного мира. Именно таким является Березинский биосферный заповедник. Многолетние исследования прямокрылых, проведенные на его территории, позволили получить разнообразный материал по этой группе, в том числе и по их жизненным формам. Результаты работы представлены в совместной публикации «Прямокрылые насекомые (Orthoptera) лесных зон Дальнего Востока России и Восточной Европы: сравнение локальных фаун заповедников» [29].

Сравнительная характеристика жизненных форм прямокрылых 6 заповедников лесных зон Восточной Европы и Дальнего Востока России свидетельствует, что набор их жизненных форм как в локальных фаунах заповедников Восточной Европы, так и Дальнего Востока практически идентичен. Отличия сводятся, главным образом, к изменению доли тех или иных форм в фаунах конкретных заповедников.

Так, набор жизненных форм прямокрылых Березинского заповедника представлен 12-ю формами из 15 установленных для всех анализируемых территорий. Отмечено, что доля топически и трофически связанных со злаками прямокрылых (злаковые и специализированные хортобионты) значительно выше в заповедниках Восточной Европы чем в заповедниках Дальнего Востока России. В отдельных случаях – больше, чем вдвое: 54,3 % – Березинский биосферный заповедник и 24,1 % – Дальневосточный морской биосферный заповедник. Доля же прямокрылых в этих заповедниках топически и трофически связанных с деревьями, кустарниками и широколиственными травами больше в заповедниках Дальнего Востока, чем Восточной Европы. И наименьшее ее значение (всего 20 %) характерно для Березинского биосферного заповедника. Доля геофилов в локальных фаунах Дальнего Востока и заповедниках Восточной Европы практически одинаковая. Сходство спектров жизненных форм прямокрылых заповедников Восточной Европы и Дальнего Востока России является примером экологического параллелизма, когда на территориях со сходной ландшафтной структурой формируется иная по видовому составу, но подобная по типу занимаемых ниш фауна [29; 30].

Заключение

Результаты полевых и лабораторных исследований прямокрылых (Orthoptera) Беларуси свидетельствуют, что жизненные формы достаточно точно характеризуют особенности условий обитания организмов благодаря экологической пластичности, являющейся отражением их адаптационного потенциала.

Составлен спектр установленных жизненных форм всех встречающихся на территории Беларуси прямокрылых, состоящий из двух классов: фитофилов и геофилов, включающих 16 жизненных форм (по 8 в каждом). Проанализирован также их набор.

Большинство прямокрылых спектра ЖФ относятся к злаковым хортобионтам – 17 видов. Значительно беднее по числу видов факультативные хортобионты (7) и по степени убывания – герпетобионты и подпокровные геофилы – 5 и 4; специализированные хортобионты и открытые геофилы содержат по 3 вида; микро- и тамнобионты представлены 2-мя; а осоково-злаковые и травоядные хортобионты, специализированные тамнобионты, роющие геофилы, норные, эремобионты, петробионты и фиссуробионты – всего по 1-му виду.

Отмечено преобладание обитателей травостоя (хортобионтов), на долю которых приходится 64 %; в значительно меньшей мере (около 8 %) присутствуют обитатели деревьев и кустарников (тамнобионты). В целом фитофилы (обитатели растений) составляют почти 72 % выявленных нами прямокрылых Беларуси. К обитателям поверхности почвы (геофилам) относится меньшая часть Orthoptera (28 %), среди которых доминируют подпокровные и открытые геофилы (14,3 и 10,7 % соответственно). Показано, что жизненные формы сами по себе и доля каждой в спектре отражают геоботанический характер территории Беларуси, находящейся в пределах лесной зоны.

Анализ ЖФ северной и южной частей Беларуси показал, что их наборы обусловлены условиями среды: в обоих ландшафтах спектр более разнообразен в естественной среде – на влажных и сухих лугах, а также в сосняках и сужается в антропогенно измененной среде. Установлено, что из 16 жизненных форм 14 являются общими для обследованных территорий северной и южной частей Беларуси, и только две из них – специализированные хортобионты – характерны для севера, а открытые геофилы – для юга Беларуси.

Выявлена адаптационная стратегия и высокая степень пластичности отдельных видов, которая показана на примере зеленчука непарного – *Chrysochraon dispar*, что проявляется в варьировании полиморфных признаков в зависимости от условий обитания, а также способности к смене стадий и сдвигу фенологических фаз. Отмечена также его роль в качестве индикатора условий среды.

Приводится сравнительная характеристика жизненных форм прямокрылых 6 заповедников лесных зон Восточной Европы и Дальнего Востока России, показавшая, что набор их жизненных форм в локальных фаунах практически идентичен. Отличия заключаются, главным образом, в изменении доли тех или иных форм в фаунах конкретных заповедников. Показано, что из 15 жизненных форм установленных для всех анализируемых заповедных территорий Восточной Европы и Дальнего Востока, набор Березинского заповедника представлен – 12-ю. Отмечено, что доля представителей класса фитофилов существенно различается в Европейских и Дальневосточных заповедниках: злаковых и специализированных хортобионтов значительно больше в заповедниках Восточной Европы, а тамнобионтов намного ниже. Геофилы

в локальных фаунах Дальнего Востока и заповедниках Восточной Европы представлены практически поровну. Значимость жизненных форм для экологической оценки среды очевидна, так как изменение их соотношения отражает изменения в биотопах под влиянием сукцессионных сдвигов или хозяйственной деятельности человека. Таким образом, выявленные индикаторные качества и адаптационные механизмы прямокрылых, проявляющиеся в жизненных формах, позволяют использовать их в качестве биоиндикаторов для оценки экологического статуса территорий и объектов мониторинга.

Библиографические ссылки

1. Бей-Биенко ГЯ, Мищенко ЛЛ. *Саранчовые фауны СССР*. Москва – Ленинград: Издательство АН СССР; 1951. 668 с.
2. Правдин ФН. Ортоптероидная группировка, ее структура и значение в биоценозе. *Труды Всесоюзного энтомологического общества*. 1974;276:38–67.
3. Стебаев ИВ. Жизненные формы и половой диморфизм саранчовых Тувы и Юго-восточного Алтая. *Зоологический журнал*. 1970;49(3):20–25.
4. Стороженко СЮ. *Длинноусые прямокрылые насекомые (Orthoptera: Ensifera) азиатской части России*. Владивосток: Дальнаука; 2004. 279 с.
5. Шарова ИХ. Жизненные формы и значение конвергенции и параллелизмов в их классификации. *Журнал общей биологии*. 1973;34(4):563–571.
6. Кривоуцкий ДА. Современные представления о жизненных формах животных. *Экология*. 1973;3:19–25.
7. Приставко ВП. Жизненные формы насекомых как критерий при отборе видов-индикаторов для экологического мониторинга (на примере жуков – Coleoptera, Carabidae). *Энтомологическое обозрение*. 1984;113(1):52–56.
8. Черняховский МЕ. Морфо-функциональные особенности жизненных форм саранчовых. *Ученые Записки МГПИ им. В. И. Ленина*. Москва: [б. н.]; 1970. с. 47–63.
9. Правдин ФН. *Экологическая география насекомых Средней Азии. Ортоптероиды*. Москва: Наука; 1978. 272 с.
10. Бей-Биенко ГЯ. К вопросу о зонально-экологическом распределении саранчовых (Orthoptera, Acrididae) в Западно-Сибирской и Зайсанской низменности. *Труды по защите растений. Серия энтомология*. 1930;1(1):51–90.
11. Бей-Биенко ГЯ. Прямокрылые – Orthoptera и кожистокрылые – Dermaptera. В: *Животный мир СССР. Зона степей. Том. 3*. Москва – Ленинград: [б. и.]; 1950. с. 379–423.
12. Бей-Биенко ГЯ. Прямокрылые – Orthoptera и кожистокрылые – Dermaptera. В: *Животный мир СССР. Лесная зона. Том. 4*. Москва – Ленинград: [б. и.]; 1953. с. 527–552.
13. Uvarov BP. Grasshoppers and locust. *Cambridge University Press*. 1977;1:481. London; 1977;2:614.
14. Стороженко СЮ. Жизненные формы кузнечиковых и ложнокузнечиковых (Orthoptera: Tettigonioidae, Gryllacridoidea) Дальнего Востока СССР. *Научные доклады высшей школы. Биологические науки*. 1982;9:40–52.
15. Стороженко СЮ. Надотряд Orthopteroidea – Ортоптероидные. *Насекомые Хинганского заповедника. Часть 1*. Владивосток: Дальнаука; 1992. с. 44–52.
16. Горохов АВ. Жизненные формы сверчков (Orthoptera, Grylloidea) Средней Азии. *Энтомологическое обозрение*. 1979;58(3):506–520.
17. Горохов АВ. Морфологические особенности сверчков родов *Murmecaphilus* Berth и *Eremogyllodes* Chop, и систематическое положение трибы Bothriophylacini (Orthoptera, Gryllidae). *Энтомологическое обозрение*. 1980;59(12):287–293.
18. Горохов АВ. Сверчковые (Orthoptera, Grylloidea) Дальнего Востока СССР. В: *Систематика и эколого-фаунистический обзор отдельных отрядов насекомых Дальнего Востока*. Владивосток: [б. и.]; 1983. с. 39–47.
19. Фасулати КК. Полевое изучение наземных беспозвоночных. Москва: Высшая школа; 1971. 304 с.
20. Копанева ЛМ, Калинин ОМ, Васильев СН, Калодяжный СФ. Методические подходы к изучению жизненных форм саранчовых на примере п/сем. Oedipodinae. *Зоологический журнал*. 1976;55(5):701–714.
21. Казакова ИГ. Морфоадаптации саранчовых (Acrididae) к использованию злаков в качестве субстратов питания, передвижения и яйцекладки. В: *Ландшафтная экология насекомых*. Новосибирск: [б. и.]; 1988. с. 26–34.
22. Кривоуцкий ДА. Современные представления о жизненных формах животных. *Экология*. 1973;3:19–25.
23. Сергеева ТП, Смирнова ЕГ, Лозинская ОВ. Жизненные формы прямокрылых (Orthoptera) Беларуси. В: *Актуальные проблемы экологии: материалы X Международной научно-практической конференции (Гродно, 1–3 октября 2014 г.). Часть 1*. – Гродно: ГрГУ; 2014. с. 132–133.
24. Правдин ФН, Гусева ВС, Крицкая ИГ, Черняховский МЕ. Некоторые принципы и приемы исследования смешанных популяций нестатных саранчовых в разных ландшафтных условиях. *Фауна и экология животных*. 1972;4:3–16.
25. Bednarsz S. Orthoptera, Blattodea and Dermaptera of Trzebnicko-Ostrzeszowskie Hills. *Acta Zoologica Cracov*. 1988;31(8):363–382.
26. Бей-Биенко ГЯ. Смена стадий наземных организмов как экологический принцип. *Вопросы экологии*. 1962;1:9–12.
27. Бей-Биенко ГЯ. Смена местообитаний наземными организмами как биологический принцип. *Журнал общей биологии*. 1966;27(1):5–21.
28. Сергеев МГ. *Закономерности распространения прямокрылых насекомых Северной Азии*. Новосибирск: Наука; 1986. 236 с.
29. Сергеева ТП, Стороженко СЮ. Прямокрылые насекомые (Orthoptera) лесных зон Дальнего Востока России и Восточной Европы: сравнение локальных фаун заповедников. В: *Чтения памяти Алексея Ивановича Куренцова. Выпуск 26*. Владивосток: [б. н.]; 2015. с. 88–98.
30. Пушкар ТИ, Стороженко СЮ. Короткоусые прямокрылые насекомые (Orthoptera, Caelifera) лесных зон Приамурья в России и равнинной части Украины. *Евразийский энтомологический журнал*. 2013;12(1):11–20.

References

1. Bey-Bienko GYa, Mishchenko LL. *Saranchiovy fauny SSSR. Chast 1* [Locust fauna of the USSR. Part 1]. Moscow – Leningrad: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR; 1951. 668 p. Russian.
2. Pravdin FN. *Ortopteroïdnaya gruppïrovka, ee struktura i znachenïye v biotsenozе* [Orthopteroid group, its structure and significance in the biocenosis]. *Trudy Vsesoyuznogo entomologicheskogo obshchestva*. 1974;276:38–67. Russian.

3. Stebaev IV. *Zhiznennyye formy i polovoy dimorfizm saranchovykh Tuvy i Yugo-vostochnogo Altaya* [Life forms and sexual dimorphism of locusts from Tuva and Southeastern Altai]. *Zoologicheskii zhurnal*. 1970;49(3):20–25. Russian.
4. Storozhenko SYu. *Dlinnoussye pryamokrylyye nasekomye (Orthoptera: Ensifera) aziatskoy chasti Rossii*. [Long-necked Orthoptera insects (Orthoptera: Ensifera) of the Asian part of Russia]. Vladivostok: Dal'nauka; 2004. 279 p. Russian.
5. Sharova IH. *Zhiznennyye formy i znachenie konvergentsii i parallelizmov v ikh klassifikatsii*. [Life forms and the meaning of convergence and parallelism in their classification]. *Zhurnal obshchey biologii*. 1973;34(4):563–571. Russian.
6. Krivolutskiy DA. *Sovremennyye predstavleniya o zhiznennykh formakh zhivotnykh* [Modern ideas about the life forms of animals]. *Ekologiya*. 1973;3:19–25. Russian.
7. Pristavko VP. *Zhiznennyye formy nasekomykh kak kriteriy pri otbore vidov-indikatorov dlya ekologicheskogo monitoringa (na primere zhuzhelits – Coleoptera, Carabidae)* [Life forms of insects as a criterion for the selection of indicator species for ecological monitoring (on the example of ground beetles – Coleoptera, Carabidae)]. *Entomologicheskoe obozreniye*. 1984;113(1):52–56. Russian.
8. Chernyakhovskiy ME. *Morfo-funktsional'nyye osobennosti zhiznennykh form saranchovykh* [Morpho-functional features of life forms of locusts]. *Uchenye Zapiski MGPI im. V. I. Lenina*. Moscow: [publisher unknown]; 1970. p. 47–63. Russian.
9. Pravdin FN. *Ekologicheskaya geografiya nasekomykh Sredney Azii. Ortopteroidy* [Ecological geography of insects in Central Asia]. Orthopteroids. Moscow: Nauka; 1978. 272 p. Russian.
10. Bey-Bienko GYa. *K voprosu o zonal'no-ekologicheskoy raspredelenii saranchovykh (Orthoptera, Acrididae) v Zapadno-Sibirskoy i Zaysanskoy nizmennosti* [On the zonal-ecological distribution of locusts (Orthoptera, Acrididae) in the West Siberian and Zaisan lowlands]. *Trudy po zashch. rast. Seriya entomologiya*. 1930;1(1):51–90. Russian.
11. Bey-Bienko GYa. *Pryamokrylyye – Orthoptera i kozhistokrylyye – Dermaptera* [Orthoptera – Orthoptera and leathery-winged – Dermaptera]. In: *Zhivotnyy mir SSSR. Zona stepy. Tom 3*. Moscow – Leningrad: [publisher unknown]; 1950. p. 379–423. Russian.
12. Bey-Bienko GYa. *Pryamokrylyye – Orthoptera i kozhistokrylyye – Dermaptera* [Orthoptera – Orthoptera and leathery-winged – Dermaptera]. In: *Zhivotnyy mir SSSR. Lesnaya zona. Tom 4*. Moscow – Leningrad: [publisher unknown]; 1953. p. 527–552. Russian.
13. Uvarov BP. Grasshoppers and locust. *Cambridge University Press*. 1977;1:481. London. 1977;2:614.
14. Storozhenko SYu. *Zhiznennyye formy kuznechikovykh i lozhnokuznechikovykh (Orthoptera: Tettigoniodea, Gryllacridoidea) Dal'nego Vostoka SSSR* [Life forms of grasshoppers and pseudohoppers (Orthoptera: Tettigoniodea, Gryllacridoidea) of the Far East of the USSR]. *Nauchnye doklady vysshey shkoly. Biologicheskoye nauki*. 1982;9:40–52. Russian.
15. Storozhenko SYu. *Nadotryad Orthopteroidea – Ortopteroidnyye*. [Superorder Orthopteroidea – Orthopteroid]. *Nasekomye Khinganskogo zapovednika. Part 1*. Vladivostok: Dal'nauka; 1992. p. 44–52. Russian.
16. Gorokhov AV. *Zhiznennyye formy sverchkovykh (Orthoptera, Grylloidea) Sredney Azii* [Life forms of crickets (Orthoptera, Grylloidea)]. *Entomologicheskoe obozreniye*. 1979;58(3):506–520. Russian.
17. Gorokhov AV. *Morfologicheskoye osobennosti sverchkov rodov Myrmecophilus Berth i Eremogyllodes Chop, i sistematicheskoye polozheniye tribu Bothriophylacini (Orthoptera, Gryllidae)* [Morphological features of crickets of the genera Myrmecophilus Berth and Eremogyllodes Chop, and the taxonomic position of the tribe Bothriophylacini (Orthoptera, Gryllidae)]. *Entomologicheskoe obozreniye*. 1980;59(12):287–293. Russian.
18. Gorokhov AV. *Sverchkovyye (Orthoptera, Grylloidea) Dal'nego Vostoka SSSR* [Crickets (Orthoptera, Grylloidea) of the Far East of the USSR]. In: *Sistematika i ekologo-faunisticheskii obzor otdel'nykh otryadov nasekomykh Dal'nego Vostoka*. Vladivostok: [publisher unknown]; 1983. p. 39–47. Russian.
19. Fasulati KK. *Polevoye izucheniye nazemnykh bespozvonochnykh* [Field study of terrestrial invertebrates]. Moscow: Vysshaya shkola; 1971. 304 p. Russian.
20. Kopaneva LM, Kalinin OM, Vasil'yev SN, Kalodyazhnyy SF. *Metodicheskiye podkhody k izucheniyu zhiznennykh form saranchovykh na primere p/sem. Oedipodinae* [Methodological approaches to the study of life forms of locusts on the example of p/sem. Oedipodinae]. *Zoologicheskii zhurnal*. 1976;55(5):701–714. Russian.
21. Kazakova IG. *Morfoadaptatsii saranchovykh (Acrididae) k ispol'zovaniyu zlakov v kachestve substratov pitaniya, peredvizheniya i yaysekladki* [Morpho-adaptation of locusts (Acrididae) to the use of cereals as substrates for feeding, locomotion, and oviposition]. V kn.: *Landshaftnaya ekologiya nasekomykh*. Novosibirsk: [publisher unknown]; 1988. p. 26–34. Russian.
22. Krivolutskiy DA. *Sovremennyye predstavleniya o zhiznennykh formakh zhivotnykh. Ekologiya* [Modern ideas about the life forms of animals]. 1973;3:19–25. Russian.
23. Sergeyeva TP, Smirnova EG, Lozinskaya OV. *Zhiznennyye formy pryamokrylykh (Orthoptera) Belarusi*. [Life forms of Orthoptera (Orthoptera) of Belarus]. In: *Aktual'nyye problemy ekologii: materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Grodno, 2014 October 1–3). Part 1*. Grodno: GrGU; 2014. p. 132–133. Russian.
24. Pravdin FN, Guseva BC, Kritskaya IG, Chernyakhovskiy ME. *Nekotoryye printsipy i priyemy issledovaniya smeshannykh populyatsiy nestadnykh saranchovykh v raznykh landshaftnykh usloviyakh* [Some principles and techniques for the study of mixed populations of non-gregarious locusts in different landscape conditions]. *Fauna i ekologiya zhivotnykh*. 1972;4:3–16. Russian.
25. Bednarz S. Orthoptera, Blattodea and Dermaptera of Trzebnicko-Ostrzeszowskie Hills. *Acta Zoology Cracov*. 1988;31(8):363–382.
26. Bey-Bienko GYa. *Smena statsiy nazemnykh organizmov kak ekologicheskii printsip* [Change of habitats of terrestrial organisms as an ecological principle]. *Environmental issues; Voprosy ekologii*. 1962;1:9–12. Russian.
27. Bey-Bienko GYa. *Smena mestoobitaniya nazemnymi organizmami kak biologicheskii printsip* [Change of habitats by terrestrial organisms as a biological principle]. *Journal of General Biology. Zhurnal obshchey biologii*. 1966;27(1):5–21. Russian.
28. Sergeyev MG. *Zakonomernosti rasprostraneniya pryamokrylykh nasekomykh Severnoy Azii* [Patterns of distribution of orthoptera insects in North Asia]. Novosibirsk: Nauka; 1986. 236 p. Russian.
29. Sergeyeva TP, Storozhenko SYu. *Pryamokrylyye nasekomye (Orthoptera) lesnykh zon Dal'nego Vostoka Rossii i Vostochnoy Evropy: sravneniye lokal'nykh faun zapovednikov* [Orthoptera insects (Orthoptera) of forest zones of the Far East of Russia and Eastern Europe: comparison of local faunas of reserves]. In: *Chleniya pamyati Aleksey Ivanovicha Kurentsova*. Vladivostok: [publisher unknown]; 2015. p. 88–98. Russian.
30. Pushkar NI, Storozhenko SYu. *Korotkousye pryamokrylyye nasekomye (Orthoptera, Caelifera) lesnykh zon Priamur'ya v Rossii i ravninnoy chasti Ukrainy* [Short-horned orthopterans (Orthoptera, Caelifera) of the forest zones of the Amur Basin in Russia and of the lowlands of Ukraine]. *Yevraziyskii entomologicheskii zhurnal*. 2013;12(1):11–20. Russian.

УДК 598.2

ОСОБЕННОСТИ ГНЕЗДОВАНИЯ ЧЕРНОГО ДРОЗДА (*TURDUS MERULA*) В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКИХ ДРЕВЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ Г. МИНСКА

В. В. САХВОН¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Синурбизированные популяции птиц характеризуются специфическими особенностями, отличающимися от таковых диких популяций своего же вида, что является результатом адаптации к обитанию в городах. В исследовании анализируются отдельные параметры гнездования черного дрозда (*Turdus merula*) на территории двух крупных парковых насаждений г. Минска и сравниваются с особенностями гнездования птиц данного вида в естественных местообитаниях. В ходе изучения в 2015–2017 и 2019–2021 гг. были получены данные по 74 случаям гнездования черных дроздов в условиях города. Для сравнения были использованы данные по 245 случаям гнездования данного вида в естественных ландшафтах. В результате было установлено, что выбор мест для расположения гнезд на городских территориях у черного дрозда остается схожим с лесными птицами, а выявленные отличия объясняются спецификой лесохозяйственных мероприятий, проводимых в городских парках. Более 74 % всех гнезд было устроено в ярусе подраста и подлеска, при этом большинство гнезд было расположено на ели обыкновенной (59,72 %). Начало откладки яиц у большинства городских черных дроздов происходит сравнительно позже (с 21.04 по 10.05), чем у птиц в лесных формациях (с 11.04 по 30.04). Это, по всей видимости, является реакцией птиц на значительную рекреационную нагрузку со стороны человека в период, когда еще деревья не покрылись листвой. Однако отличий в средней величине кладки яиц у городских ($4,17 \pm 0,72$ яиц) и лесных ($4,51 \pm 0,64$ яиц) птиц не выявлены. Невысокий успех размножения черного дрозда (39,4 %) на урбанизированной территории свидетельствует в пользу того, что гомеостаз сравнительно высокой численности городской группировки черного дрозда в г. Минске поддерживается за счет постоянного притока особей из пригородных лесов.

Ключевые слова: черный дрозд; *Turdus merula*; выбор мест для гнездования; успех размножения; синурбизация; городские птицы; урбанизированная территория.

Благодарность. Исследования выполнены в рамках проекта БРФФИ (Б21MC-041).

NESTING FEATURES OF BLACKBIRD (*TURDUS MERULA*) IN URBAN GREEN SPACES IN MINSK

V. V. SAKHVON^a

^aBelarusian State University,
4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Synurbic populations of birds are characterized by specific features that differ from those of wild populations of the same species, which is the result of adaptation to living in cities. The paper analyses some parameters of breeding of the Blackbird (*Turdus merula*) in two park in Minsk and compares them with the breeding biology of wild Blackbirds in natural habitats. During the years 2015–2017 and 2019–2021, 74 nests of urban Blackbird were obtained. For comparison,

Образец цитирования:

Сахвон ВВ. Особенности гнездования черного дрозда (*Turdus merula*) в условиях городских древесных насаждений г. Минска. Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2021;4:46–53.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-46-53>

For citation:

Sakhvon VV. Nesting features of blackbird (*Turdus merula*) in urban green spaces in Minsk. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;4:46–53. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-46-53>

Автор:

Виталий Валерьевич Сахвон – кандидат биологических наук, доцент; заместитель декана биологического факультета.

Author:

Vital V. Sakhvon, PhD (biology); docent; deputy dean of faculty of biology.
sakhvon@gmail.com

data on 245 nest of this species in natural landscapes were used. As a result, it was found that the nest selection in urban Blackbirds remains similar to wild Blackbirds in forests, and the differences are explained by the peculiarities of forestry activities carried out in urban parks. More than 74 % of all nests were built in the undergrowth layer, while most of the nests were located on the Norway spruce (59.72 %). A majority of urban Blackbirds started laying first eggs relatively later (from 21.04 to 10.05) than forest birds (from 11.04 to 30.04), which most likely results from the adaptation of birds to a significant recreational load from humans during the period when the trees have not come into leaf yet. Nevertheless, no differences were found in the average clutch size between urban (4.17 ± 0.72 eggs) and forest (4.51 ± 0.64 eggs) birds. The low breeding success of the Blackbird (39.4 %) in the urbanized area testifies to the fact that the homeostasis of the relatively high number of the urban Blackbird population in Minsk is most likely maintained due to the constant influx of individuals from local suburban forests.

Keywords: blackbird; *Turdus merula*; nest site selection; breeding success; synurbization; urban birds; urban area.

Aknowledgments. This research was carried out in the framework of the project BRFB (B21MS-41).

Введение

Урбанизированные территории включают в себя ряд самых разнообразных местообитаний, благоприятных для птиц различных экологических групп. Несмотря на экстремальный характер урбосреды, видовое богатство птиц в городах остается сравнительно высоким. К примеру, на территории Минска зарегистрировано гнездование 141 вида птиц, что составляет 60 % всей гнездящейся орнитофауны Беларуси. При этом основу орнитонаселения урбанизированных территорий помимо водно-болотных и околоводных видов птиц составляют дендрофилы (древесно-кустарниковая группа птиц), что обусловлено широким распространением на городских территориях зеленых древесных насаждений различного рода (скверы, парки, лесопарки и др.) [1]. Несмотря на заметное сходство организации ассамблей гнездящихся птиц городских древесных насаждений и лесных формаций, первые отличаются присутствием на гнездовании синурбизированных видов, которые, как правило, характеризуются сравнительно высоким обилием и значительным количественным участием в городском орнитонаселении [1; 2].

Черный дрозд (*Turdus merula*) является одним из тех типично лесных видов птиц, которые смогли успешно освоить урбанизированные территории во многих регионах Европы, сформировав здесь городские популяции, отличные по многим своим экологическим, морфофизиологическим, этологическим особенностям от популяций своего же вида из естественных ландшафтов [3–9]. Установленные изменения в биологии черного дрозда в городских условиях связаны с адаптационным ответом вида на воздействие факторов урбосреды. По всей видимости многие из такого рода впервые появившихся характеристик у городских птиц с течением времени смогли закрепиться на генетическом уровне [8; 9]. Поскольку действие элиминирующих факторов на урбанизированных территориях особенно ярко выражено, вызывает интерес способ достижения популяционного гомеостаза у синурбизированного черного дрозда в условиях города.

Существуют два основных пути поддержания численности того или иного вида птиц на урбанизированных территориях: за счет постоянного притока особей из пригородных естественных ландшафтов либо успешного размножения вида в городах [10]. Имеющиеся в литературе немногочисленные данные по особенностям гнездования черного дрозда на городских территориях в условиях Европы свидетельствуют о том, что уже сформированные синурбизированные группировки данного вида поддерживают свою численность главным образом за счет сравнительно высокого успеха размножения [11]. Несмотря на недавнее время освоения городской среды Минска черным дроздом, плотность гнездования данного вида в соответствующих биотопах к настоящему времени достигла сравнительно высоких значений [2; 12]. При этом данный вид в Минске продолжает придерживаться больших по площади городских древесных насаждений, по своей биотопической структуре близких к естественным лесным формациям, избегая солитерных древесно-кустарниковых посадок, которые охотно занимают синурбизированными популяциями птиц в условиях европейских городов. С другой стороны, отдельные особи черного дрозда в условиях Минска демонстрируют поведение, свойственное «западным» городским черным дроздам, что может свидетельствовать об аллохтонном происхождении таких птиц и, как следствие, поддержания их численности здесь за счет высокого успеха размножения. Поэтому получение данных об особенностях гнездования черного дрозда, а также характере успешности его размножения в условиях древесных насаждений Минска позволит, с одной стороны, оценить уровень синурбизации данного вида здесь, а с другой – установить вероятностное происхождение его синурбизированных группировок, что будет иметь важное как теоретическое, так и практическое значение.

Материалы и методы исследования

Изучение отдельных сторон гнездовой биологии черного дрозда проводилось в Минске на территории памятника природы республиканского значения «Дубрава» (далее – ППРЗ) и территории Центрального

ботанического сада Национальной академии наук Беларуси (далее – ЦБС) с 2015 по 2017 и с 2019 по 2021 гг. Количественный учет черного дрозда проводился с использованием метода картирования гнездовых территорий на площадках [13], при этом частично данные по плотности гнездования данного вида на модельных территориях были опубликованы [2; 12]. Поиск гнезд черного дрозда проводился со второй половины апреля и до середины июля в результате тщательного прочесывания местности. После обнаружения гнезда его локация наносилась на карту с помощью GPS-навигатора. При находке гнезда снимались стандартные его характеристики: архитектура расположения, высота над уровнем земли и содержимое. В последующем обнаруженные гнезда находились под контролем и посещались повторно через 5–10 дней, в зависимости от той стадии, на которой оно было обнаружено. Сравнительно длинный временной отрезок между посещениями гнезд был выбран с целью уменьшения обнаружения их потенциальными хищниками, поскольку на такого рода территориях со значительной рекреационной нагрузкой высок риск разорения гнезд из-за человеческого фактора. Продолжительность насиживания кладки яиц и возраст птенцов определялись исходя из литературных данных [14; 15]: длительность насиживания яйца была принята за 14 суток (от 12 до 17 суток), длительность нахождения птенца в гнезде – 14 суток (от 12 до 20 суток; при этом исходили из того, что на 6 сутки у птенцов происходит открытие глаз). Гнездо считалось успешным, если бы хотя бы один птенец покидал гнездо.

В общей сложности было исследовано 74 гнезда черного дрозда (58 гнезд в ППРЗ и 16 гнезд в ЦБС), из которых для 41 гнезда удалось проследить успех размножения. Для сравнения была использована информация по 245 случаям гнездования данного вида, полученная в разные годы в естественных ландшафтах. Следует отметить, что регистрация гнезд проводилась только в пределах высоты до 5 м, поскольку на большей высоте гнезда трудны для обнаружения и дальнейшего мониторинга, к тому же этот вид в большинстве своем связан своим гнездованием с невысоким подростом и подлеском [16; 17].

Результаты исследования и их обсуждение

Черный дрозд на обеих модельных территориях является обычным гнездящимся видом, постоянно входящим в группу доминантов в ассамблеях гнездящихся птиц, хотя плотность гнездования его варьировала (порой значительно) между годами. При этом черный дрозд более многочисленный вид на территории ППРЗ «Дубрава», где средняя плотность его гнездования за все годы исследований составила $0,88 \pm 0,26$ пар/га (от 0,61 (2015) и до 1,29 (2016) пар/га) (рис. 1). Следует отметить, что плотность гнездования данного вида в условиях городских древесных насаждений оказалась заметно выше, чем в благоприятных для данного вида пойменных дубравах и черноольшаниках в условиях Беларуси [18]. Столь высокая численность черного дрозда на модельных городских территориях по всей видимости обусловлена синурбизацией данного вида в условиях Минска, особенно заметной в последние десятилетия, когда его численность здесь постепенно нарастала.

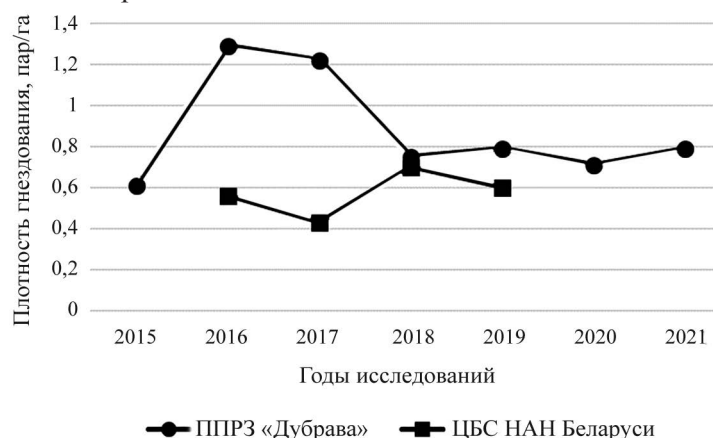


Рис. 1. Межгодовая динамика плотности гнездования черного дрозда (*Turdus merula*) на территории ППРЗ «Дубрава» и ЦБС НАН Беларуси в г. Минске

Fig. 1. Interannual dynamics of breeding density of Blackbird (*Turdus merula*) in the Republican natural monument «Dubrava» and the Central botanical garden of the National Academy of Sciences of Belarus in Minsk

Абсолютное большинство гнезд у городского черного дрозда было размещено в ярусе подроста и подлеска (74,3 %, $n = 74$), что в целом характерно для этого вида в условиях гнездования в лесных формациях Беларуси [17]. Преимущественный выбор живых деревьев и кустарников для устройства гнезд отмечен и для городских популяций дрозда в других регионах [19; 20]. Для размещения гнезд в условиях

модельных городских древесных насаждений черный дрозд выбирал как минимум 13 видов деревьев и кустарников (см. таблицу), отдавая явное предпочтение гнездованию в ели обыкновенной (*Picea abies*). Следует отметить, что гнездовой стереотип данного вида остался таковым и на урбанизированных территориях, поскольку анализ выбора мест для гнездования черным дроздом в лесах показал, что там, где присутствует в насаждениях ель обыкновенная этому виду растений также отдается явное предпочтение [17]. Тем не менее, в отличие от естественных условий, где черный дрозд сравнительно часто гнезвился на вершинах или в нишах трухлявых обломанных стволов деревьев (26,8 % всех гнезд), а также в нишах-расщелинах крупных живых деревьев и среди корней упавших деревьев (15,8 % всех гнезд) [17], в городских насаждениях количество таких случаев минимально (всего 6,8 %, $n = 73$), что объясняется биотопической структурой подобного рода территорий в условиях города, где в результате лесохозяйственных мероприятий сухостой постоянно изымается.

Выбор мест для устройства гнезд черным дроздом (*Turdus merula*) в условиях городских древесных насаждений

Nest site selection of the Blackbird (*Turdus merula*) in urban green plantations

Вид гнездового дерева/кустарника	ППРЗ «Дубрава»		ЦБС НАН Беларуси		Всего	
	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%	<i>n</i>	%
Ель обыкновенная (<i>Picea abies</i>)	43	76,79	—	—	43	59,72
Дуб черешчатый (<i>Quercus robur</i>)	5	8,93	—	—	4	5,56
Рододендрон (<i>Rhododendron</i> sp.)	—	—	5	31,25	5	6,94
Можжевельник (декоративный) (<i>Juniperus</i> sp.)	—	—	4	25,00	5	6,94
Рябина обыкновенная (<i>Sorbus aucuparia</i>)	1	1,79	—	—	1	1,39
Клен остролистный (<i>Acer platanoides</i>)	—	—	1	6,25	1	1,39
Лещина обыкновенная (<i>Corylus avellana</i>)	1	1,79	—	—	1	1,39
Тополь (<i>Populus</i> sp.)	1	1,79	—	—	1	1,39
Ольха черная (<i>Alnus glutinosa</i>)	1	1,79	—	—	1	1,39
Бирючина обыкновенная (<i>Ligustrum vulgare</i>)	—	—	1	6,25	1	1,39
Чебушник (<i>Philadelphus</i> sp.)	—	—	1	6,25	1	1,39
Черемуха Маака (<i>Prunus maackii</i>)	1	1,79	—	—	1	1,39
Лиственное дерево (неопределенное)	3	5,36	1	6,25	4	5,56
Лиственный кустарник (неопределенный)	—	—	3	18,75	3	4,17
Всего 14 видов	56	100	16	100	72	100

Высота расположения гнезд варьировала от 0,3 м и до 4,3 м, но в среднем $1,8 \pm 0,86$ м ($n = 68$), при этом в диапазоне от 0 до 1 м располагалось 9 гнезд (13,2 %), от 1,1 до 2 м – 39 гнезд (57,3 %), а свыше 2 м – 20 гнезд (29,4 %). Согласно имеющейся классификации расположения гнезд [17], для черного дрозда в условиях городских древесных насаждений отмечено 7 из 9 типов, при этом, если отбросить единичные случаи, то зарегистрировано всего 4 типа гнездорасположения (рис. 2). Абсолютное большинство гнезд приходится на 6-й тип (45,8 % всех гнезд), что также отмечено и для популяций черного дрозда, гнездящихся в лесных формациях.

В лесных формациях Беларуси гнездовой сезон у черного дрозда растянут с апреля до июля, причем за этот период дрозды могут иметь две кладки яиц [15; 21]. Такие же особенности характерны и для птиц в урбанизированном ландшафте, хотя и были установлены некоторые отличия, связанные по всей видимости с адаптацией вида к обитанию в условиях городских древесных насаждений. Так, анализ полученных данных показывает, что ко второму циклу размножения, приходящемуся судя по всему на период, начиная с начала июня, приступает всего лишь небольшое число пар. Как в естественных условиях, так и на городских территориях доля таких гнезд в каждой из групп биотопов составляет около 6 %. Следует отметить, что максимальное число случаев начала откладки первого яйца в условиях городских древесных насаждений приходится на период с 1.05 по 10.05 (37,8 % всех случаев; при этом на период с 21.04 по 10.05 – 62,1 %). В свою очередь, в лесных формациях птицы начинают гнездиться заметно раньше и максимум случаев начала яйцекладки наблюдается с 21.04 по 30.04 (36,4 %) (рис. 3).

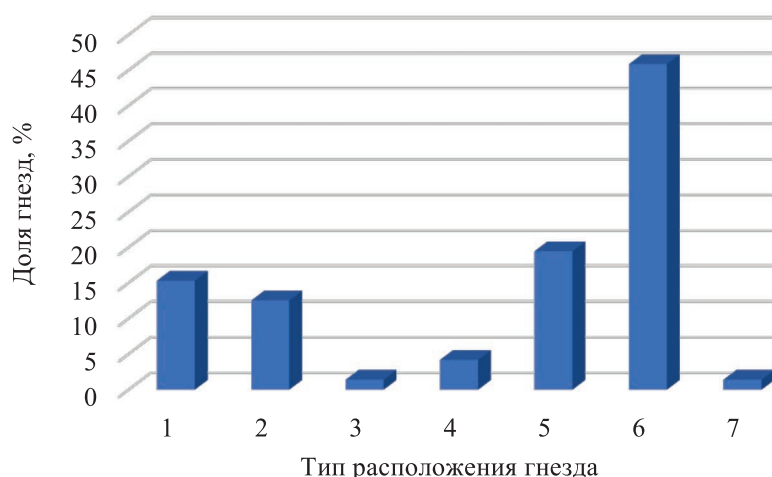


Рис. 2. Многообразие типов расположения гнезд черным дроздом ($n = 72$) в условиях городских древесных насаждений Минска согласно классификации В. В. Сахвон, В. В. Гричик [17]: 1) у главного ствола дерева или между стволами близко растущих деревьев; 2) сверху, на боковой ветви дерева на некотором удалении от ствола; 3) в месте расхождения нескольких стволов дерева у его основания; 4) в нише-расщелине ствола живого дерева; 5) на кустарниках подлеска; 6) на молодых деревцах подроста; 7) на вершине или в нише трухлявого обломанного ствола дерева

Fig. 2. Diversity of type of nest sites of Blackbirds (*Turdus merula*) ($n = 72$) in urban green plantations in Minsk according by classification of V. V. Sakhvon, V. V. Gritchik [17]: 1) at the live tree trunk; 2) on the tree branch; 3) at the base of few live tree trunks; 4) in the natural cavity; 5) in the shrub of undergrowth; 6) in the young tree of undergrowth; 7) on the dead tree trunk

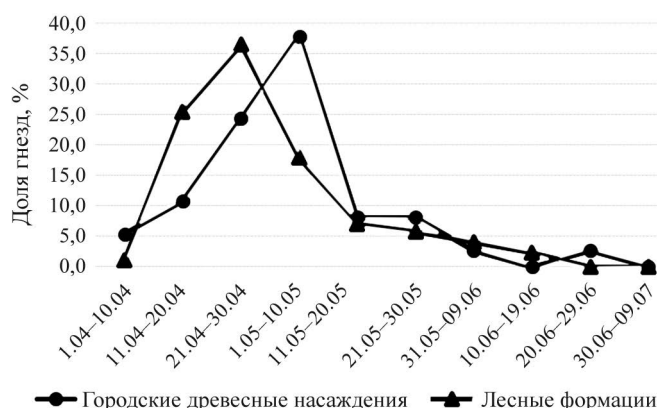


Рис. 3. Фенология гнездования (откладка первого яйца) черного дрозда (*Turdus merula*) в естественных ($n = 173$) и городских ($n = 37$) условиях

Fig. 3. Phenology of nesting (first egg laying) of blackbird (*Turdus merula*) in forests ($n = 173$) and urban ($n = 37$) areas

Установленные различия связаны по всей видимости с тем фактом, что в условиях городских насаждений в апреле, когда многие деревья еще не покрылись листвой, увеличивается фактор беспокойства птиц со стороны человека ввиду значительной рекреационной нагрузки на городские экосистемы, что в свою очередь притормаживает начало постройки гнезд и откладки яиц у городских черных дроздов. Этим объясняется и более частое использование в качестве гнездового субстрата в начале гнездового сезона ели обыкновенной, обладающей хорошими маскирующими свойствами для гнезд [22]. В Европе же черные дрозды в городах наоборот приступают к откладке яиц заметно раньше (от одной до четырех недель), чем в лесах, при этом гнездовой сезон их длится на месяц дольше, что объясняется в первую очередь оседлостью городских птиц и более «мягкими» климатическими условиями в европейских городах по сравнению с окружающими природными ландшафтами [8].

Хотя средняя величина кладки у черного дрозда в условиях городских экосистем за все годы исследований была несколько меньшей, чем в лесных формациях ($4,17 \pm 0,72$ ($n = 23$) и $4,51 \pm 0,64$ ($n = 92$) соответственно), эти различия были недостоверными (тест Манна–Уитни, $p = 0,081$, при $p < 0,05$), что было показано и для популяций данного вида в разнотипных ландшафтах в условиях Польши [23]. Однако, с другой стороны, некоторые авторы выяснили, что все же в городских условиях черные дрозды откладывают меньшее количество яиц, чем в лесных формациях [11; 24].

Из 38 гнезд черного дрозда, для которых был прослежен успех размножения вплоть до оставления гнезда птенцами, всего 15 оказались успешными (из них вылетел хотя бы 1 птенец), то есть 39,4 % всех гнезд. При этом из общего количества успешных гнезд лишь в 9 случаях (60,0 % успешных гнезд) количество вылетевших птенцов равнялось количеству отложенных яиц, то есть 100 % успешность (в 3-х гнездах – по 5 птенцов, в 6-ти – по 4 птенца). В остальных случаях вылетало заметно меньшее количество птенцов: в 1 случае – 4 птенца, в 1 случае – 3 птенца, в 1 случае – 2 птенца, остальные (4 случая) – по 1 птенцу. При этом лишь в 50 % случаев в гнезде находилось 1–2 неоплодотворенных яйца, что и объясняло меньшее число вылетевших птенцов к общему количеству отложенных яиц. В остальных случаях в ходе гнездования происходила потеря яиц или птенцов (по всей видимости из-за хищничества), но птицы после этого не оставляли гнездо, и гнездование оказывалось успешным.

Наиболее уязвимым этапом периода гнездования черного дрозда является время откладки яиц, что отмечено и в других исследованиях [20]. При этом характер размещения гнезда является ключевым показателем, напрямую влияющим на его разорение хищниками [25]. В общей сложности из всего количества находящихся под контролем гнезд 22 (56,1 % всех гнезд, $n = 41$) были разорены на стадии яиц (2 из них были брошены, в том числе и из-за гибели взрослой насиживающей птицы), и всего 1 (6,2 %; $n = 16$) – на стадии выведения птенцов. Однако высокий процент разоряемости гнезд в ранневесеннее время не может объяснен лишь «безлистным» периодом, делающим гнезда заметными для хищников, поскольку многие пары в этот период гнездятся в елях, которые обладают хорошими маскирующими свойствами. Предполагается, что немаловажное значение в условиях городских древесных насаждений играют особенности поведения птиц у гнезда при появлении потенциальной опасности, главным образом человека (а также домашних хищных животных), которые в купе с архитектурой расположения гнезда (его «заметностью» для хищников) являются ключевыми факторами, обуславливающими потерю кладок яиц и птенцов. Заблаговременное оставление насиживающей птицей гнезда при приближении человека, а также в последующем активная ее реакция на это, сопровождающаяся беспокойной вокализацией, ведут к обнаружению места расположения гнезда хищниками (сойка (*Garrulus glandarius*), белка (*Sciurus vulgaris*) и т. д.) с последующим его разорением. Полученные нами предварительные данные показывают, что существует тесная связь между поведением черного дрозда у гнезда с успехом его размножения в городских условиях, когда выгоду получают те птицы, которые либо заблаговременно и бесшумно покидают гнездо при приближении человека и не проявляют никаких форм беспокойства, либо плотно насиживающие кладку яиц и не оставляющие его даже при попытке согнать птицу.

Полученная в ходе исследований величина успешности размножения черного дрозда в условиях городских древесных насаждений Минска находится у нижних границ аналогичных показателей, установленных для городских популяций данного вида в других европейских городах, где они варьировали от 39,2 до 52,63 % [20; 26; 27]. В то же время в исключительных случаях (до 94,44 % всех гнезд) может разоряться на урбанизированных территориях [28]. Несмотря на невысокий показатель успешности размножения черного дрозда в условиях городских древесных насаждений в целом, процент разоряемых гнезд в лесных формациях у данного вида зачастую еще больший [11; 25], что, с одной стороны, является той предпочтением, которую получают птицы в экстремальной для них городской среде.

Заключение

Исходя из полученных результатов и в сравнении с литературными данными, по успешности размножения городских черных дроздов в других регионах, где уже сформированы синурбизированные группировки данного вида, можно констатировать, что к настоящему времени на модельных территориях в Минске сравнительно стабильная и высокая плотность гнездования черного дрозда не может поддерживаться исключительно успешным размножением здесь городских птиц. Возможно, значительная доля городских группировок черного дрозда в городе формируется за счет постоянного притока особей из пригородных биотопов, что может быть установлено с применением специальных исследований, связанных с мечением птиц.

Таким образом, полученные данные по особенностям размножения черного дрозда в условиях древесных насаждений Минска показывают, что у городских группировок данного вида здесь уже сформировались некоторые отличия в гнездовой биологии от «диких» птиц из естественных ландшафтов, проявляющиеся главным образом в характере выбора мест для гнездования, обусловленном особенностями лесохозяйственной деятельности в городских насаждениях, а также сравнительно более поздним началом откладки яиц у значительной части птиц, приходящимся на первую декаду мая. Установленные различия могут вполне быть объяснены синурбизацией черного дрозда в условиях урбоэкосистем города, подтверждением чему могут считаться здесь сравнительно высокие значения плотности гнездования данного вида. Полученные данные по успешности размножения черного дрозда в условиях городских древесных

насаждений позволяют считать, что сравнительно высокая численность городских птиц лишь в незначительной степени поддерживается их размножением на этой территории, поэтому существует постоянный приток особей из пригородных лесов.

Библиографические ссылки

1. Сахвон ВВ, Никифоров МЕ. Особенности формирования структуры населения птиц города Минска во временном аспекте. *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук*. 2021;66(4):412–425. DOI: 10.29235/1029-8940-2021-66-4-412-425.
2. Сахвон ВВ, Домбровский ВЧ. Многолетняя динамика населения гнездящихся птиц на территории памятника природы республиканского значения «Дубрава» (Минск). *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2018;3:48–54.
3. Wysocki D. Biometrical analysis of an urban population of the Blackbird (*Turdus merula*) in Szczecin (NW Poland). *Ring*. 2002;24(2):69–76.
4. Evans KL, Hatchwell BJ, Parnell M, Gaston KJ. A conceptual framework for the colonization of urban areas: the blackbird *Turdus merula* as a case study. *Biological Reviews*. 2010;85:643–667. DOI: 10.1111/j.1469-185X.2010.00121.x.
5. Mendes S, Colino-Rabanal V, Peris S. Bird song variations along an urban gradient: The case of the European blackbird (*Turdus merula*). *Landscape and Urban Planning*. 2011;99:51–57. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.08.013.
6. Möller AP, Jokimäki J, Skorka P, Tryjanowski P. Loss of migration and urbanization in birds: a case study of the blackbird (*Turdus merula*). *Oecologia*. 2014;175:1019–1027. DOI: 10.1007/s00442-014-2953-3.
7. Russ A, Lučeničová T, Klenke R. Altered breeding biology of the European blackbird under artificial light at night. *Journal of avian biology*. 2017;48(8):1114–1125. DOI: <https://doi.org/10.1111/jav.01210>.
8. Partecke J, Van't Hof T, Gwinner E. Differences in the timing of reproduction between urban and forest European blackbirds (*Turdus merula*): result of phenotypic flexibility or genetic differences? *Proceedings of the Royal Society B*. 2004;271:1995–2001. DOI: 10.1098/rspb.2004.2821.
9. Partecke J, Gwinner E, Bensch S. Is urbanisation of European blackbirds (*Turdus merula*) associated with genetic differentiation? *Journal für Ornithologie*. 2006;147(4):549–552. DOI: 10.1007/s10336-006-0078-0.
10. Tomiałojć L. The urban population of the wood pigeon *Columba palumbus* Linnaeus, 1758 in Europe – its origin, increase and distribution. *Acta Zoologica Cracoviensia*. 1976;21:586–631.
11. Ibáñez-Álamo JD, Soler M. Does urbanization affect selective pressures and life-history strategies in the common blackbird (*Turdus merula* L.)? *Biological Journal of the Linnean Society*. 2010;101:759–766. DOI: 10.1111/j.1095-8312.2010.01543.x.
12. Сахвон ВВ, Федоринчик КА. Межгодовая динамика видового разнообразия птиц Центрального ботанического сада НАН Беларуси (Минск). *Журнал Белорусского государственного университета. Биология*. 2020;2:66–74.
13. Библи К, Джонс М, Марсден С. *Методы полевых экспедиционных исследований: Исследования и учеты птиц*. Москва: Союз охраны птиц России; 2000. 186 с.
14. Blotzheim Glutz von UN, Bauer KM. *Handbuch der Vögel Mitteleuropas*. Band. 11/II. Passeriformes. Wiesbaden: AULA-Verlag; 1988. 888 p.
15. Никифоров МЕ, Яминский БВ, Шкляров ЛП. *Птицы Белоруссии: справочник-определитель гнезд и яиц*. Минск: Вышэйшая школа; 1989. 479 с.
16. Tomiałojć L. Breeding ecology of the Blackbird *Turdus merula* studied in the primaeval forest of Białowieża, Poland. Part. 1. Breeding numbers, distribution and nest site. *Acta ornithologica*. 1993;27(2):131–157.
17. Сахвон ВВ, Гричик ВВ. Особенности выбора мест для гнездования певчим (*Turdus philomelos*) и черным дроздами (*T. merula*) в лесах различного типа в условиях биотопической симпатрии. В: *Бранта. Сборник научных трудов Азово-черноморской орнитологической станции*. 2018;21:40–52.
18. Sakhvon VV. Composition and diversity of passerine bird assemblages in the floodplain deciduous forests during the breeding season (Belarus) В: *Бранта. Сборник научных трудов Азово-черноморской орнитологической станции*. 2009;12:29–39.
19. Nowakowski JJ. The impact of human presence on the nest distribution of Blackbird *Turdus merula* and Song Thrush *T. philomelos*. *Acta ornithologica*. 1994;29(1):59–65.
20. Лыков ЕЛ. Экология гнездования черного дрозда в условиях Калининграда. *Орнитология*. 2011;36:114–130.
21. Федюшин АВ, Долбик МС. *Птицы Белоруссии*. Минск: Наука и техника; 1967. 520 с.
22. Wysocki D. Nest site selection in the urban population of Blackbirds *Turdus merula* of Szczecin (NW Poland). *Acta ornithologica*. 2005;40(1):61–69. DOI: 10.3161/068.040.0112.
23. Wesołowski T, Czapulak A. Biologia rozrodu kosa (*Turdus merula*) i drozda spiewaka (*Turdus philomelos*) w Polsce wstępna analiza kart gniazdowych. *Notatki ornitologiczne*. 1986;27(1–2):31–60.
24. Snow DW. The breeding of the Blackbird at Oxford. *Ibis*. 1958;100:1–30.
25. Hatchwell BJ, Chamberlain DE, Perrins CM. The reproductive success of rural Blackbirds *Turdus merula* in relation to habitat structure and nest site. *Ibis*. 1996;138:256–262.
26. Tomiałojć L. Breeding ecology of the Blackbird *Turdus merula* studied in the primaeval forest of Białowieża (Poland). Part. 2. Reproduction and mortality. *Acta ornithologica*. 1994;29(2):101–121.
27. Kurucz K, Bertalan L, Purger JJ. Survival of blackbird (*Turdus merula*) clutches in an urban environment: experiment with real and artificial nests. *North-western journal of Zoology*. 2012;8(2):362–364.
28. Groom DW. Magpie *Pica pica* predation on Blackbird *Turdus merula* nests in urban areas. *Bird study*. 1993;40:55–62. DOI: 10.1080/00063659309477129.

References

1. Sakhvon VV, Nikiforov ME. Features of formation bird population structure in Minsk in the time aspect. *Viesci Nacyjanalnaj akademii navuk Bielarusi. Sieryja bijalahichnykh navuk*. [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series]. 2021;66(4):412–425. DOI: 10.29235/1029-8940-2021-66-4-412-425. Russian.

2. Sakhvon VV, Dombrovski V. Ch. Interannual dynamics of breeding bird assemblage within the republican natural monument «Dubrava» (Minsk). *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* [Journal of the Belarusian State University. Biology]. 2018;3:48–54. Russian.
3. Wysocki D. Biometrical analysis of an urban population of the Blackbird (*Turdus merula*) in Szczecin (NW Poland). *Ring*. 2002;24(2):69–76.
4. Evans KL, Hatchwell BJ, Parnell M, Gaston KJ. A conceptual framework for the colonization of urban areas: the blackbird *Turdus merula* as a case study. *Biological Reviews*. 2010;85:643–667. DOI: 10.1111/j.1469-185X.2010.00121.x.
5. Mendes S, Colino-Rabanal V, Peris S. Bird song variations along an urban gradient: The case of the European blackbird (*Turdus merula*). *Landscape and Urban Planning*. 2011;99:51–57. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.08.013.
6. Möller AP, Jokimäki J, Skorka P, Tryjanowski P. Loss of migration and urbanization in birds: a case study of the blackbird (*Turdus merula*). *Oecologia*. 2014;175:1019–1027. DOI: 10.1007/s00442-014-2953-3.
7. Russ A, Lučeničová T, Klenke R. Altered breeding biology of the European blackbird under artificial light at night. *Journal of avian biology*. 2017;48(8):1114–1125. DOI: <https://doi.org/10.1111/jav.01210>.
8. Partecke J, Van't Hof T, Gwinner E. Differences in the timing of reproduction between urban and forest European blackbirds (*Turdus merula*): result of phenotypic flexibility or genetic differences? *Proceedings of the Royal Society B*. 2004;271:1995–2001. DOI: 10.1098/rspb.2004.2821.
9. Partecke J, Gwinner E, Bensch S. Is urbanisation of European blackbirds (*Turdus merula*) associated with genetic differentiation? *Journal für Ornithologie*. 2006;147(4):549–552. DOI: 10.1007/s10336-006-0078-0.
10. Tomiałojć L. The urban population of the wood pigeon *Columba palumbus* Linnaeus, 1758 in Europe – its origin, increase and distribution. *Acta Zoologica Cracoviensia*. 1976;21:586–631.
11. Ibáñez-Álamo JD, Soler M. Does urbanization affect selective pressures and life-history strategies in the common blackbird (*Turdus merula* L.)? *Biological Journal of the Linnean Society*. 2010;101:759–766. DOI: 10.1111/j.1095-8312.2010.01543.x.
12. Sakhvon VV, Fedorynchik KA. Interannual dynamics of breeding bird assemblage within the Central botanical garden of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk). *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* [Journal of the Belarusian State University. Biology]. 2020;2:66–74. Russian.
13. Bibby C, Jones M, Marsden S. *Metody polevykh ekspeditsionnykh issledovaniy: Issledovaniya i uchety ptits* [Expedition field techniques: bird surveys]. Moscow: Soyuz ohrany ptits Rossii; 2000. Russian.
14. Blotzheim Glutz von UN, Bauer KM. *Handbuch der Vögel Mitteleuropas*. Band. 11/II. Passeriformes. Wiesbaden: AULA-Verlag; 1988. 888 p.
15. Nikiforov M. E., Yaminskij B. V., Shkljarov L. P. *Ptitsy Belorussii. Spravochnik-opredelitel' gnezd i yaits* [Birds of Belarus. Handbook-guide of nests and eggs]. Minsk: Vyshejschaya shkola; 1989. 479 p. Russian.
16. Tomiałojć L. Breeding ecology of the Blackbird *Turdus merula* studied in the primaeval forest of Białowieża, Poland. Part. 1. Breeding numbers, distribution and nest site. *Acta ornithologica*. 1993;27(2):131–157.
17. Sakhvon VV, Gritchik VV. Nest sites selection by sympatric Song Thrush (*Turdus philomelos*) and Blackbird (*Turdus merula*) in the different forests. *Branta. Transactions of the Azov-Black Sea Ornithological Station*. 2018;21:40–52. Russian.
18. Sakhvon VV. Composition and diversity of passerine bird assemblages in the floodplain deciduous forests during the breeding season (Belarus). *Branta. Transactions of the Azov-Black Sea Ornithological Station*. 2009;12:29–39.
19. Nowakowski JJ. The impact of human presence on the nest distribution of Blackbird *Turdus merula* and Song Thrush *T. philomelos*. *Acta ornithologica*. 1994;29(1):59–65.
20. Lykov EL. *Ekologiya gnezdovaniya chernogo drozda v usloviyakh Kaliningrada* [Breeding ecology of Blackbird in Kaliningrad]. *Ornithology*. 2011;36:114–130. Russian.
21. Fedzjushin AV, Dolbik MS. *Ptitsy Belorussii* [Birds of Belarussia]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1967. 520 p. Russian.
22. Wysocki D. Nest site selection in the urban population of Blackbirds *Turdus merula* of Szczecin (NW Poland). *Acta ornithologica*. 2005;40(1):61–69. DOI: 10.3161/068.040.0112.
23. Wesołowski T, Czapulak A. Biologia rozrodu kosa (*Turdus merula*) i drozda spiewaka (*Turdus philomelos*) w Polsce wstepna analiza kart gniazdowych. *Notatki ornitologiczne*. 1986;27(1–2):31–60.
24. Snow DW. The breeding of the Blackbird at Oxford. *Ibis*. 1958;100:1–30.
25. Hatchwell BJ, Chamberlain DE, Perrins CM. The reproductive success of rural Blackbirds *Turdus merula* in relation to habitat structure and nest site. *Ibis*. 1996;138:256–262.
26. Tomiałojć L. Breeding ecology of the Blackbird *Turdus merula* studied in the primaeval forest of Białowieża (Poland). Part. 2. Reproduction and mortality. *Acta ornithologica*. 1994;29(2):101–121.
27. Kurucz K, Bertalan L, Purger JJ. Survival of blackbird (*Turdus merula*) clutches in an urban environment: experiment with real and artificial nests. *North-western journal of Zoology*. 2012;8(2):362–364.
28. Groom DW. Magpie *Pica pica* predation on Blackbird *Turdus merula* nests in urban areas. *Bird study*. 1993;40:55–62. DOI: 10.1080/00063659309477129.

Статья поступила в редколлегию 15.11.2021.
Received by editorial board 15.11.2021.

УДК 581.5

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И АККУМУЛЯЦИЮ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В БИОМАССЕ БЫСТРОРАСТУЩЕЙ ИВЫ

А. А. БУТЬКО¹⁾, О. И. РОДЬКИН²⁾, В. А. РАКОВИЧ³⁾, Н. Р. МАРКИТАНТОВ²⁾

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

²⁾Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

³⁾Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси,
ул. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь

Представлены результаты исследований по оценке влияния уровня минерального питания на морфологические параметры и аккумуляцию биогенных элементов в биомассе быстрорастущей ивы (*Salix alba*) сорт Волмянка. Вегетационный эксперимент для изучения зависимости морфологических параметров ивы и аккумуляции азота и фосфора в биомассе растений от уровня минерального питания был заложен на опытно-экспериментальной площадке (53°55'24,6" N, 27°40'04,7" E) Института природопользования НАН Беларуси. Вегетационный эксперимент осуществлялся по следующим вариантам: контроль, без дополнительного внесения минеральных удобрений; вариант N₅₀P₅₀ (доза внесения 1,5 г на сосуд), вариант N₁₀₀P₁₀₀ (доза внесения 3,0 г); вариант N₁₅₀P₁₅₀ (доза внесения 4,5 г). В вегетационном эксперименте получены зависимости содержания общего азота (N_{общ}) и P₂O₅ в биомассе растения ивы от доз внесения минеральных удобрений и содержания минерального азота (N_{мин}) и P₂O₅ в почве. Влияние содержания N_{мин} (N-NO₃+NH₄) в почве на содержание N_{общ} в биомассе растения выражается высокой степенью количественной и качественной характеристикой силы связи (R² = 0,778). Влияние содержания подвижного фосфора в почве (от 200 до 600 мг/кг) на содержание P₂O₅ в биомассе растения выражается умеренной количественной и качественной характеристикой силы связи (R² = 0,403); (от 600 до 900 мг/кг) – весьма высокой (R² = 0,928). Установлено влияние минеральных удобрений на содержание P₂O₅ и N_{общ} в надземной биомассе растения в течении вегетационного периода. Определено влияние доз минеральных удобрений на продуктивность и морфологические параметры надземной биомассы растений ивы. Результаты исследований подтверждают предположение об возможности использовании плантации быстрорастущей ивы (*Salix alba*) сорта Волмянка в качестве вегетативного фильтра, способного аккумулировать азот и фосфор в биомассе растения, препятствовать их поступлению в водные объекты и снижать риск проявления эвтрофикации.

Ключевые слова: биогенные элементы; азот; фосфор; быстрорастущая ива; сорт Волмянка; *Salix alba*; продуктивность; морфологические параметры.

Образец цитирования:

Бутько АА, Родькин ОИ, Ракович ВА, Маркитантов НР. Оценка влияния уровня минерального питания на морфологические параметры и аккумуляцию биогенных элементов в биомассе быстрорастущей ивы. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;4:54–64. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-54-64>

For citation:

Butsko AA, Rodzkin AI, Rakovich VA, Markitantov NR. Assessment of the influence of the level of mineral nutrition on the morphological parameters and accumulation of biogenous elements in the biomass of the fast-growing willow. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;4:54–64. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-54-64>

Авторы:

Андрей Анатольевич Бутько – старший преподаватель кафедры энергоэффективных технологий.

Олег Иванович Родькин – доктор биологических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной экологии.

Вячеслав Александрович Ракович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией биогеохимии и агроэкологии.

Николай Радомирович Маркитантов – студент факультета горного дела и экологии.

Authors:

Andrei A. Butsko, senior lecturer at the department of energy efficient technologies.

butko_andrei@mail.ru

Aleh I. Rodzkin, doctor sciences (biology), docent; head of the department of engineering ecology.

aleh.rodzkin@rambler.ru

Viacheslav A. Rakovich, PhD (engineering); head of the laboratory of biogeochemistry and agroecology.

mire4@tut.by

Nikolaj R. Markitantov, student, faculty of mining and ecology. marknile@bk.ru

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE LEVEL OF MINERAL NUTRITION ON THE MORPHOLOGICAL PARAMETERS AND ACCUMULATION OF BIOGENOUS ELEMENTS IN THE BIOMASS OF THE FAST-GROWING WILLOW

A. A. BUTSKO^a, A. I. RODZKIN^b, V. A. RAKOVICH^c, N. R. MARKITANTOV^b

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

^bBelarusian National Technical University,
65 Niezaliežnasci Avenue, 220013 Minsk, Belarus

^cInstitute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus,
10 Skaryny Street, Minsk 220076, Belarus

Corresponding author: A. I. Rodzkin (aleh.rodzkin@rambler.ru)

The article presents the results of studies for assessment of the influence of the level of mineral nutrition on the morphological parameters and accumulation of biogenic elements in the biomass of the fast-growing willow *Salix alba*, cv. Volmyanka. A vegetation experiment to study the dependence of the morphological parameters of willow and the accumulation of nitrogen and phosphorus in the biomass of plants on the level of mineral nutrition have been done at the experimental site (53°55'24.6 "N, 27°40'04.7" E) of the Institute of Research institute of nature management Academy of science of Belarus. The vegetation experiment was based on the following options: control, without additional application of mineral fertilizers; option N₅₀P₅₀ (dose of application 0.5 g per vessel); option N₁₀₀P₁₀₀ (the dose of application is 3.0 g per vessel); option N₁₅₀P₁₅₀ (dose of application 4.5 g). In the vegetation experiments, the dependences of the content of total nitrogen (N_{tot}) and P₂O₅ in the biomass of a willow plant from the doses of mineral fertilizers and the content of mineral nitrogen (N_{min}) and P₂O₅ in the soil were obtained. The influence of the content of N_{min} (N-O₃ + NH₄) in the soil on the content of N_{tot} in the plant biomass is expressed by a high degree of quantitative and qualitative characteristics of the correlation (R² = 0.778). The influence of the content of mobile phosphorus in the soil (from 200 to 600 mg/kg) on the content of P₂O₅ in the plant biomass is expressed by a moderate quantitative and qualitative characteristic of the correlation (R² = 0.403); (from 600 to 900 mg/kg) – very high (R² = 0.928). The influence of mineral fertilizers on the content of P₂O₅ and N_{tot} in the aboveground plant biomass during the growing season has been established. The influence of the doses of mineral fertilizers on the productivity and morphological parameters of the aboveground biomass of willow plants has been determined. The research results confirm the assumption about the possibility of using the plantation of fast-growing willow (*Salix alba*), cv. Volmyanka, as a vegetative filter capable to accumulate nitrogen and phosphorus in the plant biomass, preventing their penetration into water bodies and reducing the risk of eutrophication.

Keywords: nutrients; nitrogen; phosphorus; fast-growing willow; cultivar Volmyanka; *Salix alba*; productivity; growth rate.

Введение

Интерес к быстрорастущим древесным насаждениям, кроме возможности использования биомассы в качестве возобновляемого источника энергии, также обуславливается их высоким природоохранным потенциалом (сохранение биологического разнообразия, защита почв от водной и ветровой эрозии, снегозадержание, утилизация биогенных элементов, аккумуляция диоксида углерода) [1; 2].

В этой связи ива вызывает особый интерес как растение, способное произрастать в условиях повышенной увлажненности и на почвах, характеризующихся низким уровнем плодородия и высоким содержанием органических и минеральных загрязнителей. Например, перспективным направлением является использование потенциала быстрорастущих подвидов ивы в качестве вегетативных фильтров [3; 4].

Система «почва–растение» («почва–ива») в контексте вегетационного фильтра является основой для ряда экологических процессов, наиболее важными из которых являются:

- стабилизация и удержание взвешенных и питательных веществ, содержащихся в сточных водах частицами почвенно-поглощающего комплекса;
- разложение органического вещества почвенными макро- и микроорганизмами и бактериями;
- поглощение корневой системой растения питательных веществ и поллютантов, находящихся в сточных водах в непосредственно усвояемой форме или после разложения органического вещества почвы (рис. 1).

Эксперименты свидетельствуют о высокой эффективности ивовых посадок в качестве фильтров для утилизации азота и фосфора, которые являются основными биогенными загрязнителями водоемов, стимулирующих процесс эвтрофикации последних. Такие фильтры могут быть более экономичными, чем традиционные методы контроля эвтрофикации на территории водосборов. Ивовые посадки могут эффективно утилизировать азот и фосфор, которые накапливаются в листьях и стеблях, тем самым успешно выполняя фильтрующие функции [5; 6].

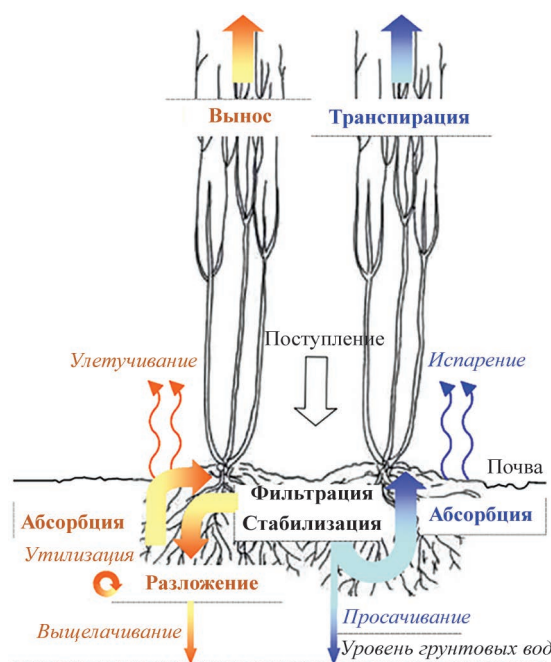


Рис. 1. Система «почва–растение» («почва–ива»)

Fig. 1. System «soil–plant» («soil–plant»)

Сезонная динамика роста растений, а также усвоение и хранение запасов питательных веществ в значительной степени контролируются внешними факторами [7–9]. Данные, взятые из научной литературы, и результаты настоящих исследований позволяют выделить закономерности в отношении роста, поглощения и распределения макроэлементов (азота и фосфора) в растениях ивы. Установлено, что содержание азота и фосфора в корнях, стеблях и листьях снижается в течение лета, в то время как содержание этих элементов в тканях увеличивается. Причем снижение содержания азота и фосфора в тканях наблюдается как при низком, так и при высоком уровне содержания питательных веществ в почве [10]. Осенью рост надземных побегов замедляется и полностью прекращается к моменту опадания листьев, что связано со снижением активности камбия. Установлено, что активность камбия полностью прекращается к концу осени при снижении температуры воздуха и продолжительности светового дня [11]. Развитие корневой системы растения осуществляется в течение всего осеннего периода [12]. Минеральный азот, попавший в это время года в почву, преобразуется в органический, который аккумулируется в корневой системе [13]. По результатам обширных исследований известно [14–17], что содержание азота в листьях, в том числе и ивы, осенью снижается, а многолетних органах растения увеличивается за счет ретранслокации. Ретранслокация также оказывает существенное влияние на снижение содержания фосфора в листьях перед ее опадом [16; 18]. В зимний период содержание азота, фосфора остается стабильным во всех органах многолетних растений. Способность к усвоению питательных веществ корневой системой ивы в условиях низких температур ранее не оценивалась количественно, но в ряде исследований установлен мелкокорневой рост ивы в середине зимы [12]. Весной выделяют три фазы развития: начало митотической активности, набухание и распускание почек и появление новых листьев. Максимальная концентрация азота в ксилемном соке наблюдается во время распускания почек и раннего развития листьев [19]. Содержание азота в корнях, черенках и стеблях снижается параллельно с развитием новых побегов [9; 20]. Установлено, что увеличения уровня питательных элементов оказывает положительное влияние на скорость роста растений.

Таким образом, представленный обзор доказывает перспективу использования плантаций ивы в качестве вегетативных фильтров, способных аккумулировать азот и фосфор в биомассе, препятствовать их поступлению в водные объекты и снижать риск проявления эвтрофикации. Одним из ключевых вопросов, который является целью наших исследований, – оценка уровня аккумуляции биогенных элементов в биомассе ивы от уровня минерального питания, что позволит прогнозировать объем содержания азота и фосфора в биомассе растений ивы и, соответственно, вынос этих элементов при уборке культуры.

Материалы и методы исследований

Вегетационный эксперимент для изучения зависимости морфологических параметров ивы и аккумуляции азота и фосфора в биомассе растений от уровня минерального питания был заложен на

опытно-экспериментальной площадке (53°55'24,6"N, 27°40'04,7"E) Института природопользования НАН Беларуси (рис. 2).



Рис. 2. Вегетационный эксперимент с растениями быстрорастущей ивы (*Salix alba*) сорт Волмянка

Fig. 2. Vegetation experiment with plants of fast-growing willow (*Salix alba*) cv. Volmyanka

В качестве посадочного материала использованы однолетние одревесневшие черенки ивы белой (*Salix alba*) сорт Волмянка [21], длиной 20 см и диаметром до 1 см. Перед посадкой черенки замачивали на срок 2-х суток для лучшего приживания. Черенки высажены 14.05.2021 в вегетационные сосуды объемом 0,019 м³, заполненные субстратом из смеси песка и торфа. Вид торфа тростниково-осоковый низинный, степень разложения 33 %. Образцы песка и торфа смешивались в соотношении 1:1.

Оценку морфометрических параметров и биопродукционных характеристик растений проводили согласно методике полевого опыта [22]. Измерения морфометрических параметров осуществлялось через каждые две недели, начиная с посадки черенков ивы. Для измерения высоты растений ивы от корневой шейки до самой высокой точки использовали рулетку. Диаметр стебля является одним из показателей, определяющих урожайность древесины ивы. Его устанавливали штангенциркулем. Количество стеблей на одно растение определяли как среднеарифметический показатель из выборки растений по опытным вариантам.

Повторность опыта 4-кратная, размещение вегетационных сосудов рендомизированное. В качестве подкормки использовано комплексное водорастворимое твердое гранулированное удобрение KRISTALON 18-18-18 Special Нидерландской компании «Яра Влардинген, Б. В.», включенное в Государственный реестр СЗР и удобрений 26.11.2021, используемых в Республике Беларусь. Их вносили 03.06.2021 в виде растворов [23]. Вегетационный эксперимент заложен по следующим вариантам: контроль, без дополнительного внесения минеральных удобрений; вариант N₅₀P₅₀ (доза внесения 1,5 г на сосуд); вариант N₁₀₀P₁₀₀. (доза внесения 3,0 г); вариант N₁₅₀P₁₅₀ (доза внесения 4,5 г д. в.).

Агрохимические показатели почв определяли по методикам: массовая доля общего азота определена методом Кьельдаля (ГОСТ 26715-85)¹; массовая доля общего фосфора – фотометрическим методом (ГОСТ 26717-85)²; нитратный азот – колориметрический метод с дисульфифеноловой кислотой [24]; аммиачный азот – колориметрически посредством реактива Нesslerа [24]; подвижные соединения фосфора – метод Кирсанова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26207-91)³. В качестве основного оборудования использован фотометр фотоэлектрический КФК-3. Почвенные образцы предварительно высушивали в лабораторных условиях в сушильном шкафу 2В-151 по ГОСТу 28268-89⁴. Образцы растительной биомассы измельчали и высушивали (ГОСТ 32975.3-2014)⁵.

Экспериментальные данные, полученные в результате исследований, обрабатывали по Б. А. Доспехову [22] с помощью методов дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализа на основе статистических программ STATISTICA v.10 и OriginPro v. 2018.

Объект исследования – сорт Волмянка ивы белой (*Salix alba*), внесенный в Государственный реестр сортов и древесно-кустарниковых пород Республики Беларусь.

¹ГОСТ 26715-85. Удобрения органические. Методы определения общего азота: введ. РБ с 17.12.92. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 1992.

²ГОСТ 26717-85. Удобрения органические. Метод определения общего фосфора: введ. РБ с 17.12.92. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 1992.

³ГОСТ 26207-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО: введ. РБ с 17.12.92. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 1992.

⁴ГОСТ 28268-89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений: введ. РБ с 17.12.92. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 1992.

⁵ГОСТ 32975.3-2014 (EN 14774-3:2009). Биотопливо твердое. Определение содержания влаги высушиванием. Часть 3. Влага аналитическая: введ. РБ с 09.11.15. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 2015.

Предмет исследований – динамика аккумулирующей способности биогенных элементов биомассой быстрорастущей ивы в зависимости от уровня минерального питания.

Результаты исследования и их обсуждение

Обеспеченность почвы минеральным азотом $N_{\text{мин}}$ в контрольном варианте в течении всего вегетационного периода характеризуется как низкая; в начале вегетационного периода для вариантов $N_{50}P_{50}$ и $N_{100}P_{100}$ – средняя и варианта $N_{150}P_{150}$ – высокая; в середине и конце вегетационного периода для всех вариантов – низкая. Динамика содержание ионов N ($N\text{-NO}_3\text{+NH}_4$) в почве характеризуются значительной сезонной зависимостью. Обеспеченность почвы минеральным азотом значительно выше в июне, чем в августе и октябре. В августе и октябре содержание $N_{\text{мин}}$ снижается незначительно в пределах 14,5–17 %. Сезонная динамика обеспеченности растения азотом в течении вегетационного периода представлена на рис. 3.

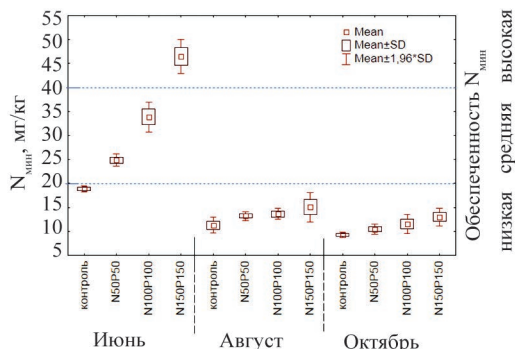


Рис. 3. Содержание и обеспеченность почвы минеральным азотом ($N\text{-NO}_3\text{+NH}_4$) $N_{\text{ферт}}$ в течении вегетационного периода

Fig. 3. Contents and level of supply of soil by mineral nitrogen ($N\text{-NO}_3\text{+NH}_4$) N_{fert} during vegetation

В разрезе вегетационного периода с июня по октябрь наблюдается снижение концентрации $N_{\text{общ}}$ в биомассе, что обусловлено его растворением вследствие быстрого роста надземной массы. Высокая концентрация $N_{\text{общ}}$ в биомассе в июне согласуется с повышенным содержанием $N\text{-NO}_3$ в почвенном растворе, откуда азот поглощается корневой системой растения. В контрольном варианте максимальное содержание $N_{\text{общ}}$ в биомассе в первой декаде июня составило 3,28 %, в августе и октябре наблюдалось снижение содержания по отношению к максимальному значению в 1,33 и 1,36 раза, что составило 2,17 и 2,08 %.

Однофакторный дисперсионный анализ не выявил статистически значимого отличия в содержании $N_{\text{общ}}$ в биомассе растения внутри вариантов в течении всего вегетационного периода. В начале периода p -уровень равен 0,43; ошибка разности средних значений – 0,074; HCP_{05} – 0,172. В середине периода p -уровень составил 0,88; ошибка разности средних значений – 0,123; HCP_{05} – 0,284. В конце периода p -уровень равен 0,81; ошибка разности средних значений – 0,015; HCP_{05} – 0,035.

Влияние фактора минеральных удобрений по результатам дисперсионного анализа на содержание $N_{\text{общ}}$ в надземной биомассе растения в начале вегетационного периода было 27,6 %, в середине – 7,4 %, в конце – 10,8 %. Уровень обеспеченности почвы подвижным фосфором во всех вариантах при различных дозах внесения минеральных удобрений характеризуется как очень высокий. В конце вегетационного периода в контрольном варианте уровень обеспеченности почвы подвижным фосфором определяется как высокий. Сезонная динамика обеспеченности растения P_2O_5 в течении вегетационного периода представлена на рис. 4.

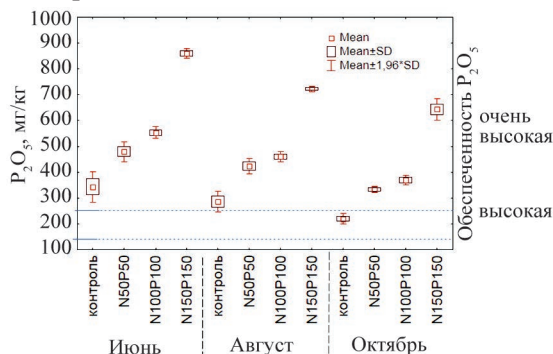


Рис. 4. Содержание и обеспеченность почвы подвижным фосфором P_2O_5 в течение вегетационного периода

Fig. 4. Contents and level of supply of soil by mobile phosphorus P_2O_5 during vegetation

В контрольном варианте максимальное содержание P_2O_5 в первой декаде июня составило $343,3 \pm 17,6$ мг/кг, в августе и октябре – $386,7 \pm 12,0$, $220 \pm 5,8$ мг/кг соответственно. Содержание P_2O_5 в почве к концу вегетационного периода снизилось на 36 %; в вариантах с удобрениями на 28–33 %.

В течение вегетационного периода (с июня по октябрь) наблюдается снижение концентрации P_2O_5 в биомассе. В контрольном варианте максимальное содержание P_2O_5 в первой декаде июня составило 0,74 %, в августе и октябре наблюдается снижение содержания по отношению к максимальному значению в 1,17 и 1,29 раза, что составило 0,61 и 0,51 % соответственно. В вариантах $N_{100}P_{100}$, $N_{150}P_{150}$ содержание P_2O_5 в биомассе в конце вегетационного периода было на 1,2 % выше по отношению к контролю.

Однофакторный дисперсионный анализ не выявил статистически значимого отличия в содержании P_2O_5 в биомассе растения внутри вариантов в течение всего вегетационного периода. В начале периода p -уровень равен 0,24; ошибка разности средних значений – 0,023; HCP_{05} – 0,05. В середине периода p -уровень составил 0,68; ошибка разности средних значений – 0,047; HCP_{05} – 0,11. В конце периода p -уровень равен 0,20; ошибка разности средних значений – 0,012; HCP_{05} – 0,03.

По результатам дисперсионного анализа, влияние фактора минеральных удобрений на содержание P_2O_5 в надземной биомассе растения в начале вегетационного периода составило 38,6 %, в середине – 20,4 %, в конце – 15,7 %.

Графическая интерпретация регрессии, выполненная взвешенным методом наименьших квадратов, описывающая содержание $N_{общ}$ и P_2O_5 в биомассе растения от дозы внесения минеральных удобрений и содержания минерального азота в почве, представлена на рис. 5, а, б.

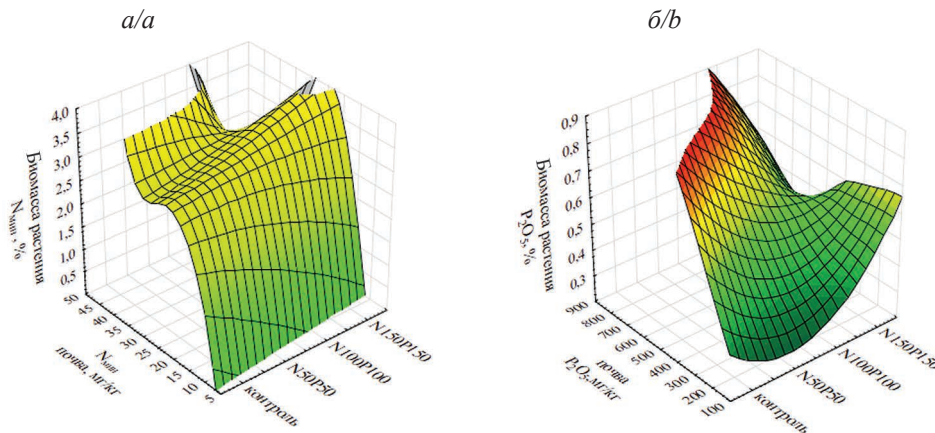


Рис. 5. Содержание $N_{общ}$ и P_2O_5 в биомассе растения ивы в зависимости от доз внесения минеральных удобрений и содержания $N_{мин}$ и P_2O_5 в почве

Fig. 5. Contents of $N_{общ}$ and P_2O_5 in plant biomass in depends of doses of fertilizer and N_{fert} and P_2O_5 contents in the soil

Для расчета содержания $N_{общ}$ в надземной биомассе растения от содержания $N_{мин}$ в почве использована сигмоидальная функция Больцмана [Boltzmann sigmoid function]:

$$f_{(Boltzman)} = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} + A_2,$$

где A_1 – начальное значение на кривой; A_2 – конечное значение на кривой; x_0 – центр кривой между конечным и конечным значением на кривой; dx – постоянная времени.

Для расчета содержания P_2O_5 в надземной биомассе растения от содержания P_2O_5 в почве использованы экспоненциальные функции [ExpGrow1]:

$$f_{(ExpGrow1)} = y_0 + A_1 e^{(x-x_0/t_1)},$$

где y_0 – смещение кривой; A_1 – амплитуда кривой; t_1 – постоянные рассеивания; x_0 – центр кривой между конечным и конечным значением на кривой, а также [ExpDec1]:

$$f_{(Expdec1)} = y_0 + A_1 e^{(x/t_1)}.$$

Выбор использованных функций [Boltzmann sigmoid function], [ExpGrow1], [ExpDec1] обуславливается достижением максимального значения коэффициента множественной корреляции между содержанием $N_{общ}$, P_2O_5 в надземной биомассе растения и содержанием минерального азота и подвижного фосфора в почве. Коэффициент корреляции рассчитан на основании алгоритма Левенберга–Марквардта с помощью метода простых итераций.

Наличие $N_{\text{общ}}$ и P_2O_5 надземной биомассе растения рассчитано для всего диапазона содержания минерального азота и подвижного фосфора в почве. Для увеличения качественной и количественной силы связи между содержанием P_2O_5 в надземной биомассе растения и P_2O_5 в почве функция [ExpGrow1] используется при P_2O_5 в почве от 200 до 600 мг/кг; функция [ExpDec1] – при P_2O_5 в почве от 600 до 900 мг/кг.

Значения эмпирических коэффициентов функции Больцмана для расчета $N_{\text{общ}}$ в надземной биомассе растения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Эмпирические коэффициенты функции [Boltzmann sigmoid function]

Table 1

Empirical coefficients of the function [Boltzmann sigmoid function]

Коэффициент	A_1	A_2	x_0	dx
$N_{\text{общ}}$	0,470	3,334	13,861	2,343

Значения эмпирических коэффициентов функции [ExpGrow1] для расчета P_2O_5 в надземной биомассе растения при содержании P_2O_5 в почве от 200 до 600 мг/кг представлены в табл. 2.

Таблица 2

Эмпирические коэффициенты функции [ExpGrow1]

Table 2

Empirical coefficients of the function [ExpGrow1]

Коэффициент	y_0	x_0	A_1	t_1
P_2O_5 (200-600 мг/кг)	0,439	-364,013	0,010	270,740

Значения эмпирических коэффициентов функции [ExpDec1] для расчета P_2O_5 в надземной биомассе растения при содержании P_2O_5 в почве от 600 до 900 мг/кг представлены в табл. 3.

Таблица 3

Эмпирические коэффициенты функции [ExpDec1]

Table 3

Empirical coefficients of the function [ExpDec1]

Коэффициент	y_0	A_1	t_1
P_2O_5 (600-900 мг/кг)	0,820	-3,980	246,231

В качестве фактора, влияющего на изменение $N_{\text{общ}}$ в биомассе растения, принято содержание минерального азота ($N-NO_3+NH_4$) в почве $N_{\text{мин}}$ в течение вегетационного периода (рис. 6, а). Вид формы связи, оценка параметров и качество предлагаемого аналитического уравнения представлено на рис. 6, б).

Полученные результаты накопления $N_{\text{общ}}$ в надземной биомассе растения от содержания минерального азота ($N-NO_3+NH_4$) в почве $N_{\text{мин}}$ в течение вегетационного периода характеризуются высокой количественной и качественной характеристикой силы связи; критерий Пирсона $\chi^2 = 0,277 < \chi^2_{\text{кр}} = 48,6$; ошибка разности средних значений – 0,450; коэффициент детерминации $R^2 = 0,778$.

В качестве фактора, влияющего на изменение P_2O_5 в биомассе растения, принято содержание подвижного P_2O_5 в почве; от 200 до 600 мг/кг (рис. 7, а); от 600 до 900 мг/кг (рис. 8, а).

Вид формы связи, оценка параметров и качество предлагаемого аналитического уравнения представлено на рис. 7, б) и рис. 8, б).

Содержание подвижного фосфора в почве P_2O_5 от 200 до 600 мг/кг характеризуется умеренной количественной и качественной характеристикой силы связи; критерий Пирсона $\chi^2 = 0,006 < \chi^2_{\text{кр}} = 37,63$; ошибка разности средних значений – 0,069; коэффициент детерминации $R^2 = 0,403$.

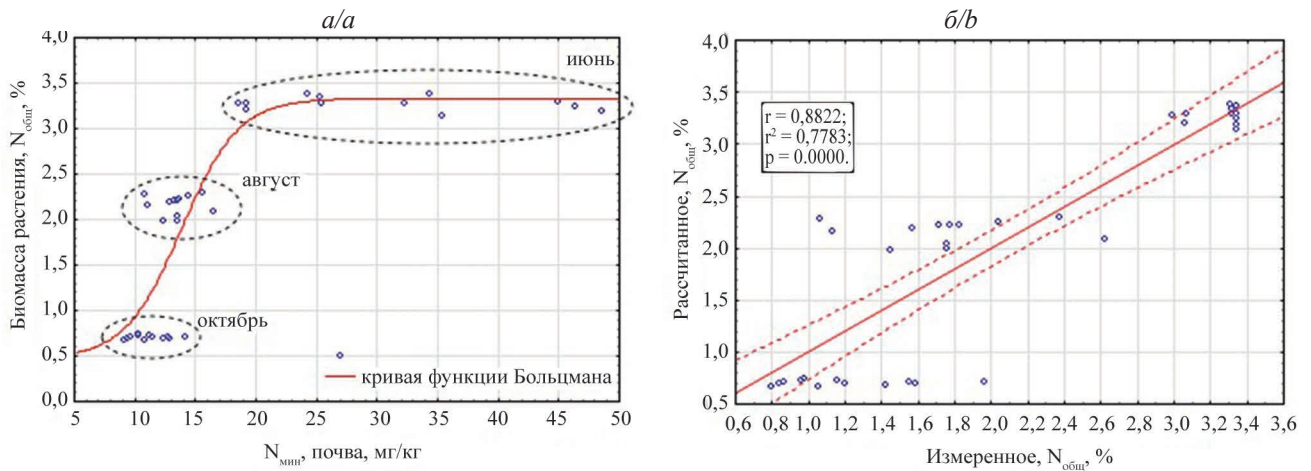


Рис. 6. Влияние содержание минерального азота ($N\text{-NO}_3\text{+NH}_4$) в почве на содержание $N_{\text{общ}}$ в биомассе растения (а); вид формы связи, оценка параметров и качество предлагаемого аналитического уравнения (б)

Fig. 6. Influence of contents of mineral nitrogen ($N\text{-NO}_3\text{+NH}_4$) in the soil on contents of N_{tot} in plants biomass (а); the type of connection, assessment of parameters and quality of proposed analytic relationship (б)

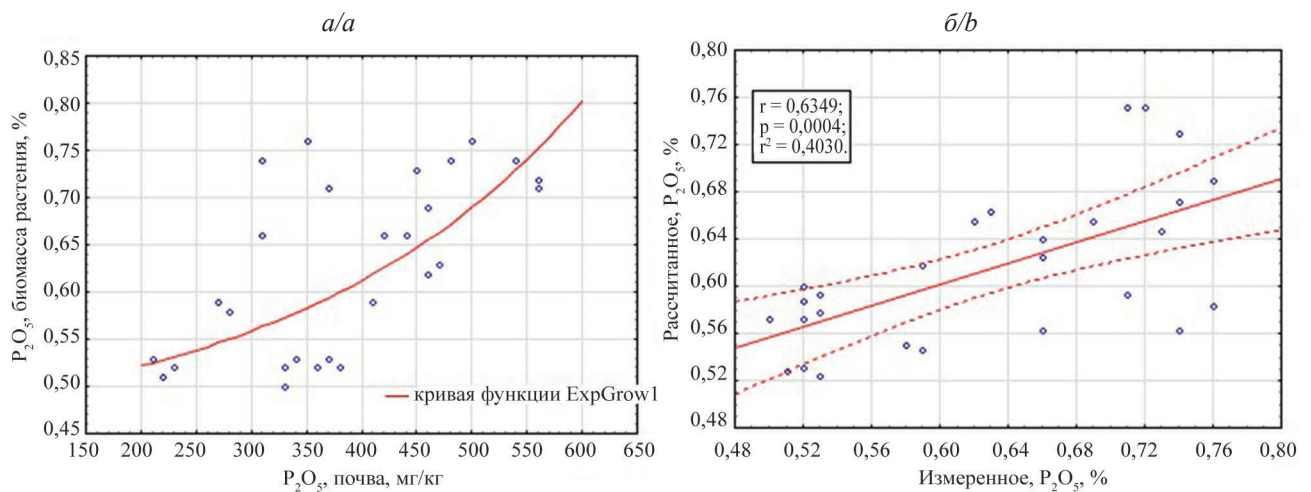


Рис. 7. Влияние содержание подвижного фосфора в почве на содержание P_2O_5 в биомассе растения (а); вид формы связи, оценка параметров и качество предлагаемого аналитического уравнения (б)

Fig. 7. Influence of contents of mobile phosphor in the soil on contents of P_2O_5 in plants biomass (а); the type of connection, assessment of parameters and quality of proposed analytic relationship (б)

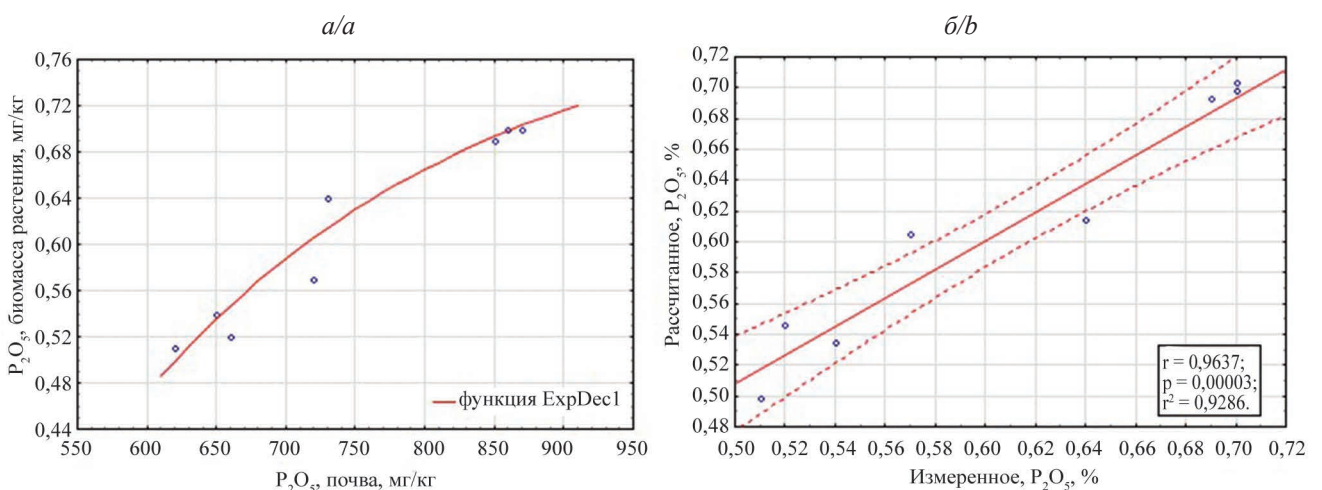


Рис. 8. Влияние содержание подвижного фосфора в почве на содержание P_2O_5 в биомассе растения (а); вид формы связи, оценка параметров и качество предлагаемого аналитического уравнения (б)

Fig. 8. Influence of contents of mobile phosphor in the soil on contents of P_2O_5 in plants biomass (а); the type of connection, assessment of parameters and quality of proposed analytic relationship (б)

Полученные результаты зависимости накопления P_2O_5 в надземной биомассе растения от содержания подвижного фосфора в почве при P_2O_5 от 600 до 900 мг/кг характеризуются весьма высокой количественной и качественной характеристикой силы связи; критерий Пирсона $\chi^2 = 5,82 < \chi^2_{кр} = 15,5$; ошибка разности средних значений – 0,064; коэффициент детерминации $R^2 = 0,928$.

Продуктивность надземной биомассы растения в контрольном варианте составила $20,35 \pm 1,29$ г/сосуд; в вариантах $N_{50}P_{50}$ и $N_{100}P_{100}$ наблюдается увеличение продуктивности на 5,6 и 13,3 %, что составило $22,26 \pm 1,26$ и $23,44 \pm 1,44$ г/сосуд, соответственно. В варианте $N_{150}P_{150}$ изменение продуктивности по отношению к контрольному варианту не превысило 1 %, а по отношению к вариантам $N_{50}P_{50}$ и $N_{100}P_{100}$ уменьшилось на 7,9 и 12,7 %, соответственно. Влияние доз удобрения на продуктивность биомассы составила 10,5 % (рис. 9).

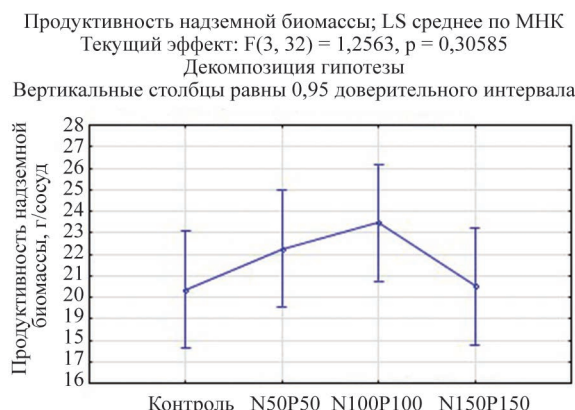


Рис. 9. Влияние доз внесения минеральных удобрений на продуктивность биомассы растения

Fig. 9. Influence of doses of fertilizer application on productivity of plants biomass

В конце вегетационного периода средняя высота растения в контрольном варианте составила $71,2 \pm 3,4$ см; в варианте $N_{50}P_{50}$ – $78,5 \pm 3,4$; $N_{100}P_{100}$ – $79,2 \pm 3,4$; $N_{150}P_{150}$ – $76,1 \pm 4,8$ см соответственно. В вариантах $N_{50}P_{50}$ и $N_{100}P_{100}$, $N_{150}P_{150}$ наблюдается увеличение высоты растений по отношению к контрольному варианту на 9,3, 10,0 и 6,4 %. Средняя скорость роста растения с момента посадки до первой декады июня в контрольном варианте составила – 1,566; $N_{50}P_{50}$ – 1,671; $N_{100}P_{100}$ – 1,528; $N_{150}P_{150}$ – 1,525 см/сутки соответственно. Скорость роста растения в варианте $N_{50}P_{50}$ выше по отношению к контролю на 6,3 %, а в вариантах $N_{100}P_{100}$, $N_{150}P_{150}$ ниже на 2,5 % и 2,7 %. С июня по июль скорость роста в контроле составила 0,908; $N_{50}P_{50}$ – 0,925; $N_{100}P_{100}$ – 0,990; $N_{150}P_{150}$ – 0,795 см/сутки, что меньше на 42,0, 73,0, 44,7 и 73,5 % по отношению к периоду с 14.05.2021 по 09.06.2021. Далее с 07.09.2021 по 11.08.2021 наблюдается более существенное снижение скорости роста растений, которая составила 0,245, 0,245, 0,253, 0,369 см/сутки. С 11.08.2021 по 03.09.2021 в контрольном варианте выявлено отсутствие роста растения, а для вариантов $N_{50}P_{50}$ – 0,038; $N_{100}P_{100}$ – 0,191; $N_{150}P_{150}$ – 0,077 см/сутки. С 03.09.2021 по 05.10.2021 по всем вариантам прирост биомассы постепенно останавливается. В вариантах с высоким содержанием питательных веществ растения прекратили рост примерно на две недели позже, чем растения в контрольном варианте с более низким содержанием питательных веществ.

В целом в течении вегетационного периода биомассы по всем вариантам статистически значимых различий в высоте растений растения в зависимости от доз внесения минеральных удобрений не выявлено. Влияние доз удобрения на высоту растения составила: июнь – 4,6 %; июль – 7,4 %; август – 1,0 %; сентябрь – 5,5 %; октябрь – 5,8 %.

Заключение

В результате проведенных исследований было выявлено, что по всем вариантам вегетационного опыта наблюдаются сезонные изменения содержания азота и фосфора в биомассе растений ивы. Максимальное содержание элементов приходится приблизительно на середину вегетационного периода. При этом влияние фактора минеральных удобрений по результатам дисперсионного анализа на содержание $N_{общ}$ в надземной биомассе растения в начале вегетационного периода составило 27,6 %, в середине – 7,4 %, в конце – 10,8 %. По фосфору влияние фактора минеральных удобрений было несколько выше: в начале вегетационного периода – 38,6 %, в середине – 20,4 %, в конце – 15,7 % соответственно.

Результаты экспериментов позволили обосновать высокий уровень корреляции содержания азота и фосфора в биомассе ивы и почве. Результаты накопления $N_{общ}$ в надземной биомассе растения от содержания минерального азота ($N-NO_3+NH_4$) в почве $N_{мин}$ в течении вегетационного периода характеризуются высокой

количественной и качественной характеристикой силы связи; критерий Пирсона $\chi^2 = 0,277 < \chi^2_{кр} = 48,6$; ошибка разности средних значений – 0,450; коэффициент детерминации $R^2 = 0,778$. По фосфору уровень взаимосвязи факторов зависит от содержания подвижного P_2O_5 в почве. При среднем уровне (от 200 до 600 мг/кг почвы) коэффициент детерминации R^2 составил 0,403, а при высоком уровне от 600 до 900 мг/кг почвы) – $R^2 = 0,928$. Полученные результаты зависимости могут стать основой для моделирования прогнозного накопления азота и фосфора в биомассе ивы при различном содержании элементов в почве.

Внесение минеральных удобрений стимулирует продуктивность и увеличение морфологических параметров растений ивы до определенного уровня. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при максимальных дозах внесения минеральных удобрений ($N_{150}P_{150}$) наблюдается торможение ростовых процессов. Этот фактор необходимо учитывать при разработке технологии выращивания ивы в плантационных посадках.

Библиографические ссылки

1. Baum C, et al. Effects of short rotation coppice with willows and poplar on soil ecology. *Landbauforschung Volkenrode*. 2009;59:183–196.
2. Hammar T, Hansson P-A, Sundberg C. Climate impact assessment of willow energy from a landscape perspective: a Swedish case study. *GCB Bioenergy*. 2017;9:973–985.
3. Aronsson P, Perttu K. Willow vegetation filters for wastewater treatment and soil remediation combined with biomass production. *Forestry Chronicle*. 2001;77:293–299.
4. Dimitriou I, Rosenqvist H. Sewage sludge and wastewater fertilization of Short Rotation Coppice (SRC) for increased bioenergy production. Biological and economic potential. *Biomass and Bioenergy*. 2011;35:835–842.
5. Dimitriou I, Aransson P. Wastewater phytoremediation treatment system in Sweden using short rotation willow coppice. Short rotation crops for bioenergy. In: IEA Bioenergy task 30. Proceedings of the Conference, 1–5 December 2003, Mount Maunganui. Tauranga, New Zealand: International Energy Agency; 2003. p. 225–228.
6. Dimitriou I, Aransson P. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva*. 2005;56:47–50.
7. Bollmark L, Sennerby-Forsse L, Ericsson T. Seasonal dynamics and effects of nitrogen supply rate on nitrogen and carbohydrate reserves in cutting-derived willow (*Salix viminalis* L.) plants. *Canadian Journal of Forest Research*. 1999;29:85–94.
8. Rytter L, Ericsson T. Leaf nutrient analysis in *Salix viminalis* L. energy forest stands growing on agricultural land. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 1993;156:349–356.
9. Fircks Y, Ericsson T, Sennerby-Forsse L. Seasonal variation of macronutrients in leaves, stems and roots of *Salix dasyclados* Wimm. grown at two nutrient levels. *Biomass and Bioenergy*. 2001;21:321–334.
10. Nilsson L-O, Ericsson T. Influence of shoot age on growth and nutrient uptake patterns in a willow plantation. *Canadian Journal of Forest Research*. 1986;16:185–190.
11. Sennerby-Forsse L, Fircks HA. Ultrastructure of cells in the cambial region during winter hardening and spring dehardening in *Salix dasyclados* Wimm. grown at two nutrient levels. *Trees*. 1987;1:151–163.
12. Rytter RM. Fine-root production and carbon and nitrogen allocation in basket willows [PhD thesis]. Silvestria: Swedish University of Agricultural Science; 1997. 36 p.
13. Dickson RE. Assimilate distribution and storage. *Physiology of trees*. 1991:51–85.
14. Ericsson T. Nutrient dynamics and requirements of forest crops. *Journal of Forestry Science*. 1994;24(2–3):133–168.
15. Titus JS, Kang S-M. Nitrogen metabolism, translocation and recycling in apple trees. *Horticultural Reviews*. 1982;4:204–246.
16. Chapin FS, Kedrowski RA. Seasonal changes in nitrogen and phosphorus fractions and autumn retranslocation in evergreen and deciduous taiga trees. *Ecology*. 1983;64: 376–391.
17. Stepien V, Brun A, Botton B, Martin F. Protein bodies in bark cells of *Populus x euramericana*. *C. R. Academy Science Paris*. 1991;313:153–158.
18. Bernier B. Nutrient cycling in *Populus*: A literature review with implications in intensively managed plantations. In: IEA/ENFOR Report 5. Ottawa: Canadian Forest Service; 1984. 46 p.
19. Glavac V, Jochheim H. A contribution to understanding the internal nitrogen budget of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Trees*. 1993;7:237–241.
20. Fircks von Y. Distribution and seasonal variation of macro-nutrients, starch and radio-nuclides in short rotation *Salix* plantations Department of Short Rotation Forestry. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences; 2000. 41 p.
21. Бейня ВА, редактор. *Государственный реестр сортов*. Минск: Государственная инспекция по испытанию и охране сортов растений; 2017. 225 с.
22. Доспехов БА. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований)*. Москва: Агропромиздат, 1985. 351 с.
23. *Государственный реестр средств защиты растений и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь*. Минск: Главная государственная инспекция по семеноводству, карантину и защите растений; 2017. 152 р.
24. Фролова АА, Анцелович МЕ, редакторы. *Агрохимические методы исследования почв*. Москва: Наука; 1965. 436 с.

References

1. Baum, C et al. Effects of short rotation coppice with willows and poplar on soil ecology. *Landbauforschung Volkenrode*. 2009;59:183–196.
2. Hammar T, Hansson P-A, Sundberg C. Climate impact assessment of willow energy from a landscape perspective: a Swedish case study. *GCB Bioenergy*. 2017;9:973–985.
3. Aronsson P, Perttu K. Willow vegetation filters for wastewater treatment and soil remediation combined with biomass production. *Forestry Chronicle*. 2001;77:293–299.

4. Dimitriou I, Rosenqvist H. Sewage sludge and wastewater fertilization of Short Rotation Coppice (SRC) for increased bioenergy production. Biological and economic potential. *Biomass and Bioenergy*. 2011;35:835–842.
5. Dimitriou I, Aransson P. Wastewater phytoremediation treatment system in Sweden using short rotation willow coppice. Short rotation crops for bioenergy. In: IEA Bioenergy task 30. Proceedings of the Conference, 1–5 December 2003, Mount Maunganui. Tauranga, New Zealand: International Energy Agency; 2003. p. 225–228.
6. Dimitriou I, Aransson P. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva*. 2005;56:47–50.
7. Bollmark L, Sennerby-Forsse L, Ericsson T. Seasonal dynamics and effects of nitrogen supply rate on nitrogen and carbohydrate reserves in cutting-derived willow (*Salix viminalis* L.) plants. *Canadian Journal of Forest Research*. 1999;29:85–94.
8. Rytter L, Ericsson T. Leaf nutrient analysis in *Salix viminalis* L. energy forest stands growing on agricultural land. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 1993;156:349–356.
9. Fircks Y, Ericsson T, Sennerby-Forsse L. Seasonal variation of macronutrients in leaves, stems and roots of *Salix dasyclados* Wimm. grown at two nutrient levels. *Biomass and Bioenergy*. 2001;21:321–334.
10. Nilsson L-O, Ericsson T. Influence of shoot age on growth and nutrient uptake patterns in a willow plantation. *Canadian Journal of Forest Research*. 1986;16:185–190.
11. Sennerby-Forsse L, Fircks HA. Ultrastructure of cells in the cambial region during winter hardening and spring dehardening in *Salix dasyclados* Wimm. grown at two nutrient levels. *Trees*. 1987;1:151–163.
12. Rytter RM. Fine-root production and carbon and nitrogen allocation in basket willows [PhD thesis]. Silvestria: Swedish University of Agricultural Science; 1997. 36 p.
13. Dickson RE. Assimilate distribution and storage. *Physiology of trees*. 1991:51–85.
14. Ericsson T. Nutrient dynamics and requirements of forest crops. *Journal of Forestry Science*. 1994;24(2–3):133–168.
15. Titus JS, Kang S-M. Nitrogen metabolism, translocation and recycling in apple trees. *Horticultural Reviews*. 1982;4:204–246.
16. Chapin FS, Kedrowski RA. Seasonal changes in nitrogen and phosphorus fractions and autumn retranslocation in evergreen and deciduous taiga trees. *Ecology*. 1983;64: 376–391.
17. Stepien V, Brun A, Botton B, Martin F. Protein bodies in bark cells of *Populus x euramericana*. *C. R. Academy Science Paris*. 1991;313:153–158.
18. Bernier B. Nutrient cycling in *Populus*: A literature review with implications in intensively managed plantations. In: IEA/ENFOR Report 5. Ottawa: Canadian Forest Service; 1984. 46 p.
19. Glavac V, Jochheim H. A contribution to understanding the internal nitrogen budget of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Trees*. 1993;7:237–241.
20. Fircks von Y. Distribution and seasonal variation of macro-nutrients, starch and radio-nuclides in short rotation *Salix* plantations Department of Short Rotation Forestry. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences; 2000. 41 p.
21. Semashko TV, editor. *Gosudarstvennyj reestr sortov* [State register of varieties]. Minsk: State Inspectorate for testing and protection of plant varieties; 2017. 225 p. Russian.
22. Dospehov VA. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovanij)* [Field experiment methodology (with the basics of statistical processing of research results)]. Moscow: Agropromizdat; 1985. 351 p. Russian.
23. *Gosudarstvennyj reestr sredstv zashhity rastenij i udobrenij, razreshennyh k primeneniju na territorii Respubliki Belarus* [State Register of plant protection products and fertilizers permitted for use on the territory of the Republic of Belarus]. Minsk: State Inspection for seed breeding, plant protection and quarantine; 2017. 152 p. Russian.
24. Frolova AA, Ancelovich ME, editors. *Agrohimicheskie metody issledovanija pochv* [Agrochemical methods of soils investigation]. Moscow: Science; 1965. 463 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 02.12.2021.
Received by editorial board 02.12.2021.

УДК 797.212.071.5:614.8.027.1+615.277

КАНЦЕРОГЕННЫЙ И НЕКАНЦЕРОГЕННЫЙ РИСК ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ ОТ ПОТРЕБЛЕНИЯ КАРТОФЕЛЯ И ОВОЩЕЙ, ВЫРАЩИВАЕМЫХ В ПРЕДЕЛАХ АГРОСЕЛИТЕБНЫХ ЛАНДШАФТОВ

Т. Н. МЫСЛЫВА¹⁾, О. Н. ЛЕВШУК¹⁾

¹⁾Белорусская государственная сельскохозяйственная академия,
ул. Мичурина, 5, 213407, г. Горки, Могилевская обл., Беларусь

Одним из действенных методов предупреждения опасности, обусловленной воздействием канцерогенных и неканцерогенных химических веществ на человека, является установление риска наступления нежелательных эффектов с целью дальнейшей разработки методов его минимизации. Цель настоящего исследования – установление величины неканцерогенного и канцерогенного риска, обусловленного поступлением тяжелых металлов при употреблении в пищу картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных ландшафтов г. Горки, а также при попадании контаминантов в организм человека пероральным, ингаляционным и перкутанным путем непосредственно из почвы.

Установлено, что максимальный вклад в экспозицию Cu, Zn, Mn и Cd, поступающих в организм взрослого населения г. Горки, вносят свекла столовая, картофель и капуста белокочанная. Для детского населения максимальный вклад в экспозицию Cu и Cd вносят морковь столовая и картофель, а основным источником поступления в организм Zn, Mn и Pb являются картофель и капуста белокочанная. Суммарный уровень канцерогенного риска от употребления в пищу картофеля и овощей в течение жизни за счет таких канцерогенов, как Pb и Cd, по международной критериальной шкале оценивается как средний, неканцерогенный риск для здоровья взрослого и детского населения вследствие

Образец цитирования:

Мыслыва ТН, Левшук ОН. Канцерогенный и неканцерогенный риск для населения от потребления картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных ландшафтов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;4:65–75.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-65-75>

For citation:

Myslyva TN, Levshuk ON. Carcinogenic and non-carcinogenic risk for the population from the consumption of potatoes and vegetables growing within the limits of agro-residential landscapes. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;4:65–75. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-65-75>

Авторы:

Тамара Николаевна Мыслыва – доктор сельскохозяйственных наук, доцент; заведующий кафедрой геодезии и фотограмметрии.
Оксана Николаевна Левшук – аспирант кафедры кадастра и земельного права.

Authors:

Tamara N. Myslyva, doctor of science (agriculture), docent; head of the department of geodesy and photogrammetry.
byrty41@yahoo.com
Oksana N. Levshuk, graduate student at the department of cadaster and land law.
levshuk-2011@mail.ru

ингаляционного, перорального и перкутанного поступления тяжелых металлов из загрязненной почвы оценивается как ничтожно малый, а канцерогенный риск находится на допустимом уровне.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы для разработки стратегии управления риском для населения вследствие загрязнения урбаноземов, картофеля и овощей тяжелыми металлами, предусматривающей последовательное прохождение следующих этапов: сравнительная оценка и ранжирование риска; определение уровней приемлемости риска; снижение и контроль риска; реагирование на риск.

Ключевые слова: картофель; овощи; тяжелые металлы; население; канцерогенный и неканцерогенный риск.

CARCINOGENIC AND NON-CARCINOGENIC RISK FOR THE POPULATION FROM THE CONSUMPTION OF POTATOES AND VEGETABLES GROWING WITHIN THE LIMITS OF AGRO-RESIDENTIAL LANDSCAPES

T. N. MYSLYVA^a, O. N. LEVSHUK^a

^aBelarussian State Agricultural Academy,
5 Michurina Street, Gorki 220030, Mogilev Region, Belarus
Corresponding author: T. N. Myslyva (byrty41@yahoo.com)

One of the most effective methods of preventing the danger caused by the impact of carcinogenic and non-carcinogenic chemicals on humans is to establish the risk of undesirable effects in order to further development methods to minimize it. The purpose of this study is to establish the magnitude of the non-carcinogenic and carcinogenic risk caused by the intake of heavy metals when consuming potatoes and vegetables grown within the agro-residential landscapes of Gorki, as well as when contaminants enter the human body by the oral, inhalation and percutaneous route directly from the soil.

It has been established that the maximum contribution to the exposure of Cu, Zn, Mn and Cd entering the body of the adult population of the city of Gorki is made by beetroot, potatoes and white cabbage. Table carrots and potatoes make the maximum contribution to the exposure of Cu and Cd for the child population, while the main sources of Zn, Mn, and Pb intake are potatoes and white cabbage. The total level of carcinogenic risk from the consumption of potatoes and vegetables due to such carcinogens as Pb and Cd is estimated as average according to the international criterion scale. The non-carcinogenic risk to the health of both adults and children due to inhalation, oral and percutaneous intake of heavy metals from contaminated soil is assessed as negligible, and the carcinogenic risk is at an acceptable level.

The results of the studies performed can be used to develop a risk management strategy for the population due to pollution of urban soils, potatoes and vegetables with heavy metals, providing for the sequential passage of the following stages: comparative assessment and ranking of risk; determination of risk acceptability levels; risk reduction and control; response to risk.

Keywords: potatoes; vegetables; heavy metals; population; carcinogenic and non-carcinogenic risk.

Введение

Среди глобальных экологических проблем одной из наиболее актуальных в условиях современного экологического кризиса является загрязнение биосферы. Доказано, что более 90 % всех болезней человека прямо или косвенно связаны с окружающей средой, которая выступает либо причиной возникновения заболеваний, либо непосредственно способствует их развитию. Однако наиболее опасным свойством загрязняющих веществ является их способность вызывать появление злокачественных новообразований [1]. Заболеваемость злокачественными новообразованиями в Республике Беларусь, как и во всем мире, с каждым годом неуклонно растет, а ежегодный прирост составляет примерно 1000 новых случаев. Ежегодно от злокачественных новообразований в стране умирает свыше 13 тыс. городских и свыше 5 тыс. сельских жителей, и этот показатель имеет устойчивую тенденцию к росту¹. Установлено, что 85–90 % всех случаев возникновения рака определяется влиянием канцерогенов окружающей среды: из них 70–80 % связывают с химическими и 10 % – с радиационными факторами [2]. Среди химических веществ с наиболее высокой степенью канцерогенности выделяют полициклические ароматические углеводороды, нитрозамины и тяжелые металлы [3]. Одним из действенных методов предупреждения опасности, обусловленной воздействием канцерогенных и неканцерогенных химических веществ на человека, является установление риска наступления нежелательных эффектов с целью дальнейшей разработки методов его минимизации. Вопросам анализа структурной нагрузки канцерогенов и неканцерогенных загрязнителей на население

¹Здравоохранение в Республике Беларусь: офиц. стат. сб. Минск: ГУ РНПЦ МТ, 2019.

посвящены многие зарубежные исследования [4–7], однако для условий Беларуси, в частности для территории малых городов, они не проводились.

Исходя из этого, целью настоящего исследования стало установление степени неканцерогенного и канцерогенного риска, обусловленного поступлением тяжелых металлов при употреблении в пищу картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных ландшафтов г. Горки, а также при попадании контаминантов в организм человека пероральным, ингаляционным и перкутанным путем непосредственно из почвы. Задачи изучения предусматривали: 1) определение величины экспозиции химическими контаминантами на уровне медианы и 90-го перцентиля жителей г. Горки и установление вклада отдельных сельскохозяйственных культур в общую экспозицию контаминантами; 2) выявление неканцерогенного и канцерогенного риска для населения вследствие употребления в пищу картофеля и овощей, загрязненных тяжелыми металлами, а также посредством попадания контаминантов из загрязненной почвы пероральным, ингаляционным и перкутанным путем; 3) разработка стратегии управления риском для населения г. Горки вследствие загрязнения урбаноземов, картофеля и овощей тяжелыми металлами.

Материалы и методы исследования

Исследования выполнялись в течение 2017–2021 гг. в пределах индивидуальной жилой застройки микрорайонов «Заречье», «Слобода» и «Академия», а также садовых товариществ «Труд», «Иваново», «Яблонька», «Верхнее озеро» и «Садовод», находящихся в пределах административной границы г. Горки Могилевской обл., жители которых занимаются индивидуальным огородничеством и садоводством, и употребляя в пищу получаемую растениеводческую продукцию. Оценку величины канцерогенного и неканцерогенного риска выполняли по общепринятым методикам.

Оценка риска развития неканцерогенных эффектов осуществлялась посредством сравнения фактических уровней экспозиции контаминантов с безопасными уровнями воздействия (референтными дозами) и расчета коэффициента опасности (HQ), выражающего отношение оцененной дозы контаминанта к допустимой. Оценка риска развития неканцерогенных эффектов при комплексном воздействии тяжелых металлов проводилась посредством расчета индекса опасности (HI) как суммы коэффициентов опасности для отдельных компонентов смеси воздействующих химических веществ².

Расчет степени индивидуального канцерогенного риска (ICR) выполнялся посредством умножения среднесуточной дозы поступления канцерогена в организм человека на фактор наклона (SF), характеризующий степень нарастания канцерогенного риска с увеличением воздействующей дозы на одну единицу и отражающий верхнюю, консервативную оценку канцерогенного риска за ожидаемую продолжительность жизни человека (70 лет). Величина популяционного канцерогенного риска (PCR) определялась как произведение индивидуального канцерогенного риска на численность исследуемой популяции³.

Для оценки риска для здоровья населения вследствие ингаляционного, перорального и перкутанного поступления тяжелых металлов из загрязненной почвы использовали методику оценки рисков, разработанную Агентством по охране окружающей среды США⁴. Средняя дневная доза (ADD – мг/кг массы тела/день) для трех возможных путей воздействия (проглатывание, контакт с кожей и вдыхание) оценивалась с использованием уравнений (1), (2) и (3), а факторы воздействия, используемые для расчетов, приведены в табл. 1:

$$ADD_{ing} = (C \cdot Ring \cdot CF \cdot ED) / (BW \cdot AT), \quad (1)$$

$$ADD_{inh} = (C \cdot Rin_h \cdot EF \cdot ED) / (PEF \cdot BW \cdot AT), \quad (2)$$

$$ADD_{derm} = (C \cdot SA \cdot CF \cdot SL \cdot ABS \cdot ED) / (BW \cdot AT), \quad (3)$$

где ADD_{ing} – суточное количество металлов, поступающее в организм человека пероральным путем;

ADD_{inh} – суточное количество металлов, поступающее в организм человека ингаляционным путем;

ADD_{derm} – суточное количество металлов, поступающих в организм человека при накожном воздействии.

²Определение экспозиции и оценка риска воздействия химических контаминантов пищевых продуктов на население: метод. указания. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010.

³Рахманин Ю. А., Новиков С. М., Шашина Т. А. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004; Методика оценки риска здоровью населения факторов среды обитания: инструкция по применению № 025-1211 от 08.06.2012 г. Минск: Республиканский научно-практический центр гигиены, 2012.

⁴Risk Assessment Guidance for Superfund: Volume I. Part A. Human health evaluation manual. Washington: US Environmental Protection Agency; 1989.

Таблица 1

Факторы экспозиции для дозовых моделей, используемые для оценки риска для здоровья населения от загрязненных тяжелыми металлами урбаноземов на территории г. Горки

Table 1

Exposure factors for dose models that were used to assess the risk to public health from heavy metal contaminated urban soils in Gorki

Фактор экспозиции	Характеристика фактора экспозиции	Единица измерения	Значение фактора экспозиции	
			дети	взрослые
C	Содержание тяжелого металла в почве	мг/кг	—	—
R _{ing}	Скорость всасывания из почвы	мг/день	200	100
EF	Частота воздействия	дней/год	180	180
ED	Продолжительность хронического воздействия	лет	6	24
BW	Средняя масса тела	кг	15	70
AT	Среднее время неканцерогенного воздействия	дней	365 · ED	
CF	Коэффициент преобразования	кг/мг	1 · 10 ⁻⁶	
R _{inh}	Скорость ингаляции	м ³ /день	7,6	20
PEF	Коэффициент выбросов частиц пыли	м ³ /кг	1,36 · 10 ⁹	
SA	Площадь поверхности кожи, контактирующей с пылью	см ²	2800	5700
SL	Адгезионный фактор	мг/см ²	0,07	0,2
ABS	Фактор кожной абсорбции (химический специфический)	—	0,001	
AT	Среднее время канцерогенного воздействия	дней	25,550 (365 дней · 70 лет)	
F	Доля местных потенциально загрязненных продуктов в суточном рационе	—	1	

Информация о годовом потреблении картофеля и овощей взрослыми получена из приказа Министерства здравоохранения Российской Федерации № 614 от 19 августа 2016 г. «Об утверждении Рекомендаций по рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям»⁵, а сведения о годовом потреблении картофеля и овощей детьми – с официального сайта Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по продовольствию⁶.

Результаты исследования и их обсуждение

Оценка экспозиции является этапом оценки риска, в процессе которого устанавливается количественное поступление агента (тяжелого металла) в организм человека пероральным путем в результате контакта с различными объектами окружающей среды. На начальном этапе оценки риска поступления тяжелых металлов, в том числе канцерогенов, в организм жителей г. Горки, употребляющих в пищу картофель и овощи, выращиваемые в пределах агроселитебных ландшафтов, был проведен расчет экспозиции химическими контаминантами на уровне медианы и 90-го перцентиля. При этом величина экспозиции определялась как рассчитанное количество агента в конкретном объекте окружающей среды, находящееся в соприкосновении с пограничными органами человека (пищеварительный тракт) в течение какого-либо точно установленного времени (в данном случае дни) и выражалась как величина воздействия, нормализованная с учетом массы тела мг / (кг · день). Установлено, что суммарная годовая экспозиция тяжелых металлов, поступающих вследствие употребления в пищу картофеля и овощей (по медианному значению), для взрослого населения составляет 17 мг/кг массы тела, а для детского – достигает 120 мг/кг, а максимальный суммарный вклад в экспозицию контаминантов вносят цинк и марганец (табл. 2).

⁵Об утверждении Рекомендаций по рациональным нормам потребления пищевых продуктов, отвечающих современным требованиям. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc> (дата обращения: 10.10.2021).

⁶Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию. URL: <http://www.new.belproduct.com/o-centre/struktura/rup-nauchno-prakticheskiy-centr-nacionalnoy-akademii-nauk-belarusi-po-prodovolstviu/otdel-pitaniya/racionalnye-normy-potrebleniya-pishhevyh-produktov.html> (дата обращения: 10.10.2021).

Таблица 2

Суммарная экспозиция тяжелых металлов, поступающих вследствие употребления в пищу картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных ландшафтов г. Горки, мг/кг массы тела/сутки

Table 2

Total exposure of heavy metals as a result of the consumption of potatoes and vegetables grown within the agro-residential landscapes of Gorki, mg/kg body weight/day

Группа воздействия	Название оценочного показателя	Название химического элемента					Суммарная экспозиция
		Cu	Zn	Mn	Pb	Cd	
Взрослые	Exp _{med}	0,005160	0,025195	0,015803	0,000393	0,000077	0,046628
	Exp _{90%}	0,008357	0,035405	0,024691	0,001733	0,000415	0,070601
Дети	Exp _{med}	0,036711	0,177712	0,110599	0,003170	0,000633	0,328825
	Exp _{90%}	0,061164	0,254098	0,167720	0,013628	0,003403	0,500013

Максимальный вклад в экспозицию Cu, Zn, Mn и Cd, поступающих в организм взрослого населения г. Горки, вносят свекла столовая, вклад которой в зависимости от вещества-загрязнителя колеблется от 47 до 57 %, и картофель (его доля составляет 17–29 %). Для свинца приоритетными по экспозиции являются все тот же картофель (46 %) и капуста белокочанная (30 %) (табл. 3).

Таблица 3

Вклад отдельных культур в общее значение экспозиции тяжелых металлов, поступающих вследствие употребления в пищу картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных ландшафтов г. Горки, %

Table 3

Contribution of individual crops to the total value of the exposure of heavy metals incoming as a result of consumption potatoes and vegetables grown within the agro-residential landscapes of Gorki, %

Название культуры	Группа воздействия	Название химического элемента				
		Cu	Zn	Mn	Pb	Cd
Картофель	Взрослые	27,07	18,84	17,33	45,78	28,80
	Дети	51,54	36,52	34,10	44,61	42,65
Свекла столовая	Взрослые	55,77	56,39	56,90	6,51	47,20
	Дети	6,43	6,62	6,78	0,38	4,27
Морковь столовая	Взрослые	7,17	6,85	6,69	14,70	18,40
	Дети	22,08	21,46	21,29	23,09	43,92
Капуста белокочанная	Взрослые	7,47	14,76	16,32	29,88	4,00
	Дети	13,53	27,21	30,54	27,82	5,69
Лук репчатый	Взрослые	2,52	3,15	2,76	3,13	1,60
	Дети	6,42	8,19	7,28	4,10	3,48

Примечание. Расчет выполнялся для медианных значений экспозиции тяжелых металлов.

Для детского населения максимальный вклад в экспозицию меди и кадмия вносят морковь столовая (22 и 44 % соответственно) и картофель (52 и 43 % соответственно), а основным источником поступления в организм цинка, марганца и свинца являются картофель (37–44 %) и капуста белокочанная (27–31 %).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что НQ содержания тяжелых металлов в картофеле и овощах, выращиваемых в пределах агроселитебных ландшафтов г. Горки и употребляемых в пищу взрослым населением на уровне 90-го перцентиля, превышает 1,0, поэтому необходимо усилить контроль за содержанием контаминантов в тех сельскохозяйственных культурах, которые вносят максимальный вклад в общее значение экспозиции тяжелых металлов (табл. 4).

Таблица 4

Неканцерогенный риск, обусловленный поступлением тяжелых металлов при употреблении в пищу картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных ландшафтов г. Горки

Table 4

Non-carcinogenic risk due to the intake of heavy metals with potatoes and vegetables grown within the agro-residential landscapes of Gorki

Тяжелый металл	Среднесуточная экспозиция металла, AD, мг/кг массы тела/сутки		Референтная доза при хроническом пероральном поступлении RfD, мг/кг/сутки	Коэффициент опасности HQ	
	Exp _{med}	Exp _{90 %}		Exp _{med}	Exp _{90 %}
Взрослые					
Медь	0,005160	0,008357	0,019	0,272	0,440
Цинк	0,025195	0,035405	0,3	0,084	0,118
Марганец	0,015803	0,024691	0,14	0,113	0,176
Свинец	0,000393	0,001733	0,0035	0,112	0,495
Кадмий	0,000077	0,000415	0,0005	0,154	0,830
Суммарный индекс опасности, HI				0,735	2,059
Дети					
Медь	0,036711	0,061164	0,019	1,932	3,219
Цинк	0,177712	0,254098	0,3	0,592	0,847
Марганец	0,110599	0,167720	0,14	0,790	1,198
Свинец	0,003170	0,013628	0,0035	0,906	3,894
Кадмий	0,000633	0,003403	0,0005	1,266	6,806
Суммарный индекс опасности, HI				5,486	15,964

В разрезе отдельных элементов ни на уровне медианы, ни на уровне 90-го перцентиля коэффициент опасности не превышал допустимого значения, что свидетельствует об относительной безопасности употребления картофеля и овощей в случае их моноэлементного загрязнения. Для детского населения HQ содержания марганца и свинца в картофеле и овощах превышал 1,0 на уровне 90-го перцентиля, а меди и кадмия – еще и на медианном уровне. Данный факт свидетельствует о том, что при употреблении в пищу картофеля и овощей воздействие на организм детей присутствующих в них тяжелых металлов характеризуется как недопустимое. При значении данного показателя $1 < HQ < 5$ можно констатировать, что подвергнутое воздействию детское население находится в интервале уровня беспокойства.

Оценку канцерогенного риска, под которым понимают вероятность повышения частоты новообразований у людей за счет перорального воздействия химических канцерогенов [1], осуществляли посредством расчета величин индивидуального, суммарного и популяционного рисков. Среди исследуемых тяжелых металлов канцерогенный риск определяли для химических элементов с доказанным канцерогенным эффектом – свинца и кадмия (табл. 5).

Установлено, что суммарный уровень канцерогенного риска от употребления в пищу картофеля и овощей в течение жизни только за счет двух идентифицированных канцерогенов (Pb и Cd) составляет $0,39 \cdot 10^{-3} - 0,47 \cdot 10^{-3}$ для медианных значений и $0,24 \cdot 10^{-3} - 1,93 \cdot 10^{-3}$ для 90-го перцентиля, что по международной критериальной шкале оценивается как средний канцерогенный риск.

Следует подчеркнуть, что в связи со стохастическим характером канцерогенного процесса, его длительным латентным периодом, отличиями в возрастной чувствительности и сложным характером временной и возрастной зависимости достоверности смерти человека, точно предусмотреть сроки развития злокачественных новообразований на основе имеющейся на сегодня научной информации в популяции не представляется возможным. Кроме того, при оценке канцерогенного риска от употребления в пищу картофеля и овощей, загрязненных тяжелыми металлами, не учитывается возможное снижение дозы экспозиции вследствие их переработки (варения, тушения, соленья и т. д.). В этой связи ситуацию с загрязнением картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных ландшафтов г. Горки, нельзя считать критической или опасной, но она требует пристального внимания со стороны как органов охраны здоровья, так и органов государственной власти и местного самоуправления.

Таблица 5

Индивидуальный и популяционный канцерогенный риски, обусловленные поступлением тяжелых металлов при употреблении в пищу картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных ландшафтов г. Горки

Table 5

Individual and population carcinogenic risk due to the intake of heavy metals with potatoes and vegetables grown within the agro-residential landscapes of Gorki

Тяжелый металл	Группа воздействия	Индивидуальный канцерогенный риск (вероятность), ICR		Популяционный канцерогенный риск (число случаев), PCR		Уровень индивидуального канцерогенного риска
		Exp _{med}	Exp ₉₀ %	Exp _{med}	Exp ₉₀ %	
Свинец	Взрослые	$0,18 \cdot 10^{-4}$	$0,81 \cdot 10^{-4}$	0,63	2,80	Средний
	Дети	$0,15 \cdot 10^{-3}$	$0,64 \cdot 10^{-3}$	0,81	3,47	Средний
Кадмий	Взрослые	$0,29 \cdot 10^{-4}$	$0,16 \cdot 10^{-3}$	1,00	5,41	Средний
	Дети	$0,24 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-3}$	1,30	7,01	Средний
Суммарный риск	Взрослые	$0,47 \cdot 10^{-4}$	$0,24 \cdot 10^{-3}$	1,64	8,21	Средний
	Дети	$0,39 \cdot 10^{-3}$	$1,93 \cdot 10^{-3}$	2,11	10,49	Средний

Примечание. По состоянию на 01.01.2021 г., взрослое население г. Горки составляло 34 332 человека, детское население – 5 424 ребенка (<http://gorki.gov.by/region/4299-naselenie-regiona.html>).

В урбанизированной среде существует также и потенциальный риск для здоровья населения из-за поступления тяжелых металлов, содержащихся в почве и пыли с городских дорог. Поступая из указанных источников, они могут накапливаться в организме человека через прямое вдыхание, проглатывание и абсорбцию при попадании на кожу [6]. Результаты оценки не канцерогенного риска, обусловленного поступлением тяжелых металлов пероральным, ингаляционным и перкутаным путем из загрязненных урбаноземов в организм жителей г. Горки, свидетельствуют, что величина последнего для детского населения при поступлении в организм цинка и кадмия на порядок выше риска для взрослого населения. Однако суммарный индекс опасности для обеих групп воздействия не превышает допустимого уровня (меньше 1,0), что свидетельствует об отсутствии значимого не канцерогенного риска для здоровья населения, который можно оценить как ничтожно малый (табл. 6).

Таблица 6

Неканцерогенный и канцерогенный и, обусловленные поступлением тяжелых металлов пероральным, ингаляционным и перкутаным путем из загрязненных урбаноземов в организм жителей г. Горки

Table 6

Non-carcinogenic and carcinogenic risk due to the intake of heavy metals into the body of residents of Gorki by the oral, inhalation and percutaneous routes from contaminated urban soils

Тяжелый металл	Суммарный индекс опасности, HI		Суммарный канцерогенный риск (вероятность), ICR		Суммарный популяционный риск (число случаев), PCR	
	дети	взрослые	дети	взрослые	дети	взрослые
Cu	$8,41 \cdot 10^{-5}$	$4,08 \cdot 10^{-5}$	—	—	—	—
Zn	$1,56 \cdot 10^{-5}$	$6,15 \cdot 10^{-6}$	—	—	—	—
Mn	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$0,63 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	—
Pb	$9,47 \cdot 10^{-5}$	$1,16 \cdot 10^{-5}$	$6,85 \cdot 10^{-6}$	$7,55 \cdot 10^{-7}$	0,037	0,026
Cd	$1,32 \cdot 10^{-5}$	$2,09 \cdot 10^{-6}$	$1,55 \cdot 10^{-8}$	$1,72 \cdot 10^{-9}$	$8,41 \cdot 10^{-5}$	$5,89 \cdot 10^{-5}$

Суммарный канцерогенный риск, обусловленный поступлением тяжелых металлов пероральным, ингаляционным и перкутаным путем из загрязненных урбаноземов также находится на допустимом уровне, каковым считается наличие индивидуального риска в течение всей жизни, равного или меньшего $1 \cdot 10^{-6}$, что соответствует одному дополнительному случаю возникновения онкологического заболевания или смерти на 1 млн экспонированных лиц. Такой уровень риска воспринимается как пренебрежимо малый, не отличающийся от обычных, повседневных рисков и не требующий никаких дополнительных

мероприятий по его снижению. Следовательно, можно констатировать, что урбаноземы на территории г. Горки при существующем уровне их загрязнения тяжелыми металлами не несут серьезной опасности для взрослого и детского населения как источник поступления контаминантов.

Стратегия управления риском для населения г. Горки вследствие загрязнения урбаноземов, картофеля и овощей тяжелыми металлами предусматривает последовательное прохождение следующих этапов (табл. 7).

Таблица 7

Стратегия управления риском для населения г. Горки

Table 7

Risk management strategy for the population of Gorki

Этап управления	Цель управляющего действия	Способ реализации управляющего действия
Сравнительная оценка и ранжирование риска	Установить приоритетные источники риска для здоровья населения	Определение неканцерогенного и канцерогенного рисков для здоровья взрослого и детского населения. Определение неканцерогенного риска в отношении тропных органов и систем организма взрослого и детского населения
Определение уровней приемлемости риска	Установить значимость и приемлемость риска	Определение восприятия риска различными группами населения
Снижение и контроль риска	Минимизировать либо устранить риск	Исключение из рациона культур с максимальным вкладом в экспозицию контаминантов. Мониторинг экспозиции контаминантов и риска
Реагирование на риск	Решить потенциальные либо существующие проблемы, связанные с рисками	Избегание риска посредством полного устранения угрозы. Смягчение риска посредством принятия мер для уменьшения его воздействия. Принятие риска как ничтожно малого

На первом этапе управления необходимо выполнить сравнительную характеристику существующих рисков с целью определения круга вопросов, требующих первоочередного внимания, установление вероятности появления риска и его последствий. Этот этап предусматривает определение уровней вероятности развития нарушений состояния здоровья (посредством оценки неканцерогенного и канцерогенного рисков) и анализ их причинной обусловленности (поиск источников загрязнения с максимальным вкладом в экспозицию контаминантов), а также углубленную характеристику неблагоприятных последствий и ущербов состоянию здоровья населения (табл. 8).

На этапе анализа приемлемости риска учитывается возможность осуществления контролирующих (регулирующих) мер с целью уменьшения потенциального негативного воздействия контаминантов на окружающую среду и здоровье человека. Довольно часто для установления приемлемости риска используется метод экономического анализа «затраты – выгода». Однако, поскольку в данном конкретном исследовании речь идет об оценке риска в частном секторе, менее детерминированном и менее подверженном централизованному регулированию, оценка приемлемости риска посредством экономического анализа часто является неосуществимой.

Этап снижения и контроля уровней риска предусматривает мероприятия, максимально способствующие минимизации или устранению риска. Они могут включать как ограничение количества экспонируемых лиц, так и ограничение сферы использования источника риска или территорий с локализацией таких источников. Контроль риска осуществляют посредством его периодического либо постоянного мониторинга, что позволяет быстро реагировать на возникновение опасной ситуации, осуществлять прогнозирование уровней экспозиции контаминантов и величины риска.

Целью последнего этапа стратегии управления риском является реагирование на риск, который уже превратился в проблему. Данное мероприятие возможно осуществить тремя способами:

- минимизировать риск, полностью устранив причину угрозы. Для конкретного рассматриваемого случая это может быть рекомендация родителям, дошкольным и школьным учреждениям уменьшить употребление в пищу детьми сельскохозяйственных культур, выращиваемых в пределах агроселитебных ландшафтов г. Горки;

- смягчить риск посредством принятия мер для уменьшения его воздействия. Для конкретного рассматриваемого случая это может быть [8]:

- а) отказ от употребления в пищу сельскохозяйственных культур, которые вносят максимальный вклад в экспозицию контаминантов; б) удаление внутреннего кочана, особенно его коровой части, у капусты

белокочанной; в) удаление нижней части корнеплодов у столовой свеклы, где концентрируется максимальное количество цинка, свинца и кадмия; г) удаление сердцевинной части корнеплода у моркови столовой, выращенной в условиях загрязнения цинком и свинцом; д) удаление кожуры с периферийной зоной у картофеля в случае сверхнормативного загрязнения его тяжелыми металлами; е) удаление у лука репчатого доньшка, концентрирующего до 20 % кадмия и цинка;

– принять риск, предположив вероятность его негативного воздействия.

При составлении плана реагирования на риск (табл. 9) глубина его детализации должна соответствовать значимости риска, поскольку существует его ненулевая концепция, предусматривающая постоянное наличие.

Таблица 8

Характеристика уровней риска для населения г. Горки вследствие загрязнения урбанизированных почв, картофеля и овощей тяжелыми металлами

Table 8

Characteristics of the risk levels for the population of Gorki due to heavy metals contamination of urban soils, potatoes and vegetables

Вид риска	Уровень риска				
	мини-мальный	незначительный	умеренный	высокий	очень высокий
Неканцерогенный риск для здоровья взрослого населения от монозагрязнения картофеля и овощей тяжелыми металлами					
Неканцерогенный риск для здоровья взрослого населения от полизагрязнения картофеля и овощей тяжелыми металлами					
Неканцерогенный риск для здоровья детского населения от монозагрязнения картофеля и овощей тяжелыми металлами					
Неканцерогенный риск для здоровья детского населения от полизагрязнения картофеля и овощей тяжелыми металлами					
Канцерогенный риск для здоровья взрослого населения от загрязнения картофеля и овощей свинцом и кадмием					
Канцерогенный риск для здоровья детского населения от загрязнения картофеля и овощей свинцом и кадмием					
Неканцерогенный риск для здоровья взрослого населения от полизагрязнения почвы тяжелыми металлами					
Неканцерогенный риск для здоровья детского населения от полизагрязнения почвы тяжелыми металлами					
Канцерогенный риск для здоровья взрослого населения от полизагрязнения почвы тяжелыми металлами					
Канцерогенный риск для здоровья детского населения от полизагрязнения почвы тяжелыми металлами					

Примечание: 1) при наличии минимального уровня риска фиксируется ограниченное негативное воздействие на группу риска, а необходимость в принятии дополнительных корректирующих и предупреждающих мер отсутствует; 2) при незначительном уровне риска имеет место незначительное негативное воздействие на небольшую группу населения или небольшую группу риска и требуется проведение небольшого числа дополнительных корректирующих и предупреждающих мероприятий с затратой минимальных ресурсов; 3) при умеренном уровне риска присутствует умеренное негативное воздействие на большую группу населения или большую группу риска и требуется проведение определенного числа дополнительных корректирующих и предупреждающих мероприятий – иногда с затратой умеренных ресурсов; 4) при высоком уровне риска осуществляется значительное негативное воздействие на небольшую группу населения или небольшую группу риска и требуется проведение большого числа дополнительных корректирующих и предупреждающих мероприятий – иногда с затратой значительных ресурсов.

Таблица 9

План реагирования на риск для населения г. Горки вследствие
загрязнения урбаноземов, картофеля и овощей тяжелыми металлами

Table 9

Plan of response to the risk for the population of Gorki due to heavy metals contamination of urban soils, potatoes and vegetables

Вид риска	Способ реагирования на риск		
	минимизация	смягчение	принятие
Неканцерогенный риск для здоровья взрослого населения от монозагрязнения картофеля и овощей тяжелыми металлами			
Неканцерогенный риск для здоровья взрослого населения от полизагрязнения картофеля и овощей тяжелыми металлами			
Неканцерогенный риск для здоровья детского населения от монозагрязнения картофеля и овощей тяжелыми металлами			
Неканцерогенный риск для здоровья детского населения от полизагрязнения картофеля и овощей тяжелыми металлами			
Канцерогенный риск для здоровья взрослого населения от загрязнения картофеля и овощей свинцом и кадмием			
Канцерогенный риск для здоровья детского населения от загрязнения картофеля и овощей свинцом и кадмием			
Неканцерогенный риск для здоровья взрослого населения от полизагрязнения почвы тяжелыми металлами			
Неканцерогенный риск для здоровья детского населения от полизагрязнения почвы тяжелыми металлами			
Канцерогенный риск для здоровья взрослого населения от полизагрязнения почвы тяжелыми металлами			
Канцерогенный риск для здоровья детского населения от полизагрязнения почвы тяжелыми металлами			

Риск для здоровья населения г. Горки от употребления картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных ландшафтов, при существующем уровне их загрязнения оценивается как средний либо низкий (допустимый), однако данные продукты составляют от 40 до 50 % в структуре рациона жителей городов и поселков городского типа в Республике Беларусь⁷. Таким образом, целесообразным представляется информирование жителей об опасности и обеспечение мониторинга качества растениеводческой продукции, выращиваемой населением в пределах агроселитебных ландшафтов г. Горки.

Важно отметить, что при распространении информации о риске необходимо принимать во внимание факт особенностей его восприятия целевой аудиторией, каковой являются жители г. Горки. Как и любые другие обыватели, они в своем восприятии риска ориентируются не только на его количественные характеристики и возможные последствия для здоровья, но и на устойчивые сформировавшиеся стереотипы и общественное мнение, что может привести как к недооценке, так и к переоценке риска.

Заключение

Оценка риска развития неканцерогенных эффектов, выполненная посредством определения значения коэффициента опасности, свидетельствует о необходимости усиления контроля за содержанием контаминантов в тех сельскохозяйственных культурах, которые вносят максимальный вклад в общее значение экспозиции тяжелых металлов в организм как взрослого, так и детского населения г. Горки.

При наличии хронического перорального поступления тяжелых металлов в организм взрослого населения критическим органом, для которого существует наиболее высокий риск поражения, являются почки, тогда как у детей максимальному негативному воздействию будут подвергаться почки, кровь, кровеносные органы и центральная нервная система.

Суммарный уровень канцерогенного риска от употребления в пищу картофеля и овощей в течение жизни за счет таких канцерогенов, как Pb и Cd, по международной критериальной шкале оценивается как

⁷Социальное положение и уровень жизни населения Республики Беларусь: стат. сб. Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2021.

средний риск, требующий динамического контроля и углубленного изучения источников и возможных последствий вредных воздействий для принятия соответствующих мер по управлению риском в направлении его минимизации.

Неканцерогенный риск для здоровья как взрослого, так и детского населения вследствие ингаляционного, перорального и перкутанного поступления тяжелых металлов из загрязненной почвы оценивается как ничтожно малый, а канцерогенный находится на допустимом уровне, каковым считается наличие индивидуального риска в течение всей жизни, равного или меньшего $1 \cdot 10^{-6}$.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы для разработки стратегии управления риском для населения вследствие загрязнения урбаноземов, картофеля и овощей тяжелыми металлами, предусматривающие последовательное прохождение следующих этапов: сравнительная оценка и ранжирование риска; определение уровней приемлемости риска; снижение и контроль риска; реагирование на риск, предусматривающее его избегание, смягчение либо принятие.

Библиографические ссылки

1. Онищенко ГГ, Новиков СМ, Рахманин ЮА. *Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду*. М.: [б. и.]; 2002.
2. Долл Р, Пито Р. *Причины рака*. К.: Наука; 1984.
3. Надточий ПП, Мыслыва ТН, Белявский ЮА. Канцерогенный и неканцерогенный риск от употребления картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных ландшафтов г. Житомир. *Экологический вестник*. 2015;1:80–87.
4. Zheng N, Lui J, Wang Q. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, northeast of China. *Science of the Total Environment*. 2010;408:726–733. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.10.075.
5. Ahmed F, Ishiga H. Trace metal concentrations in street dusts of Dhaka city, Bangladesh. *Atmospheric Environment*. 2006;40:3835–3844. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.03.004.
6. Chonokhuu S, Batbold Ch, Chuluunpurev B, et al. Contamination and health risk assessment of heavy metals in the soil of major cities in Mongolia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019;16:2552. DOI:10.3390/ijerph16142552.
7. Harmanescu M, Alda LM, Bordean DM, Gogoasa I, Gergen I. Heavy metals health risk assessment for population via consumption of vegetables grown in old mining area; a case study: Banat County, Romania. *Chemistry Central Journal*. 2011;5(64):2–10.
8. Мислива ТМ, Герасимчук ЛО, Греков ВО. Ведення сільськогосподарського виробництва у приватному секторі в умовах посиленого антропогенного впливу на навколишнє середовище. Житомир: ЖНАЕУ; 2011.

References

1. Onishchenko GG, Novikov SM, Rahmanin YuA. *Osnovy otsenki riska dlya zdorov'ya naseleniya pri vozdeystvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu* [Basics for assessing the risk to public health when exposed to chemicals that pollute the environment]. Moscow: [publisher unknown]; 2002. Russian.
2. Doll P, Pito R. *Prichiny raka* [Cancer causes]. Kiev: Nauka; 1984. Russian.
3. Nadtochyj PP, Myslyva TN, Belyavskij YuA. Carcinogenic and non-carcinogenic risk from consuming potatoes and vegetables growing within the limits of agrosettle landscapes of Zhitomir. *Ekologicheskij vestnik*. 2015;1:80–87. Russian.
4. Zheng N, Lui J, Wang Q. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, northeast of China. *Science of the Total Environment*. 2010;408:726–733. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.10.075.
5. Ahmed F, Ishiga H. Trace metal concentrations in street dusts of Dhaka city, Bangladesh. *Atmospheric Environment*. 2006;40:3835–3844. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.03.004.
6. Chonokhuu S, Batbold Ch, Chuluunpurev B, et al. Contamination and health risk assessment of heavy metals in the soil of major cities in Mongolia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019;16:2552. DOI:10.3390/ijerph16142552.
7. Harmanescu M, Alda LM, Bordean DM, Gogoasa I, Gergen I. Heavy metals health risk assessment for population via consumption of vegetables grown in old mining area; a case study: Banat County, Romania. *Chemistry Central Journal*. 2011;5(64):2–10.
8. Myslyva TM, Gerasymchuk LO, Grekov VO. Conducting agricultural production in the private sector in conditions of increased anthropogenic impact on the environment. Zhytomyr: ZhNAEU; 2011. Ukrainian.

Статья поступила в редакцию 20.10.2021.
Received by editorial board 20.10.2021.

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 504.064.36:550.53(476)

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОЧВАХ И В РАСТЕНИЯХ ПШЕНИЦЫ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. А. САМУСИК¹⁾, С. Е. ГОЛОВАТЫЙ²⁾

¹⁾Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,
ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь

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

Исследования дерново-подзолистых почв лесных и сельскохозяйственных земель в зоне воздействия предприятия по производству строительных материалов показали, что газопылевые выбросы существенно влияют на содержание в почвах и растениях тяжелых металлов. Оценка содержания валовых форм тяжелых металлов в дерново-подзолистых почвах лесных и сельскохозяйственных земель, попадающих в зону воздействия ОАО «Красносельскстройматериалы», свидетельствует о полиэлементном загрязнении почв кадмием, мышьяком и цинком. Загрязнение почв лесных и сельскохозяйственных земель свинцом носит фрагментарный характер. Наибольшая встречаемость проб с превышением гигиенических нормативов для почв лесных земель установлена для валовых форм цинка, а для почв сельскохозяйственных земель – кадмия и мышьяка. Оценка подвижных форм металлов

Образец цитирования:

Самусик ЕА, Головатый СЕ. Тяжелые металлы в почвах и в растениях пшеницы в зоне воздействия предприятия по производству строительных материалов. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;4:76–88.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-76-88>

For citation:

Samusik EA, Golovaty SE. Heavy metals in soils and wheat plants in the area of influence of a building materials enterprise. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;4:76–88. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-76-88>

Авторы:

Елена Андреевна Самусик – старший преподаватель кафедры экологии.

Сергей Ефимович Головатый – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; заведующий кафедрой экологического мониторинга и менеджмента.

Authors:

Elena A. Samusik, senior lecture at the department of ecology.
e.samusik@mail.ru

Sergey E. Golovaty, doctor of science (agriculture), full professor; head of the department of environmental monitoring and management.
sscience@yandex.ru

выявила загрязнение почв преимущественно цинком и свинцом. Загрязнение почв кадмием незначительное и носит фрагментарный характер. Отмечается, что дерново-подзолистые почвы сельскохозяйственных земель в северо-восточном направлении от предприятия характеризуются высоким уровнем загрязнения подвижными формами цинка и свинца. В исследованиях не выявлены превышения максимально допустимых безопасных уровней содержания кадмия и свинца в зерне и соломе пшеницы, однако максимальные концентрации данных элементов в растениях этой культуры на некоторых участках в среднем на 25–60 % выше по сравнению с таковыми на контрольных участках, что указывает на наличие локальных зон, в которых наблюдается повышенное накопление тяжелых металлов в сельскохозяйственных растениях. В этой связи в зоне воздействия ОАО «Красносельскстройматериалы» необходимо организовать мониторинг качества растениеводческой продукции на содержание тяжелых металлов.

Ключевые слова: производство строительных материалов; газопылевое загрязнение; элементы-загрязнители; предельно допустимая концентрация; дерново-подзолистые почвы; растительная продукция.

HEAVY METALS IN SOILS AND WHEAT PLANTS IN THE AREA OF INFLUENCE OF A BUILDING MATERIALS ENTERPRISE

E. A. SAMUSIK^a, S. E. GOLOVATYI^b

*^aYanka Kupala State University of Grodno,
22 Ažeshka Street, Grodno 230023, Belarus*

*^bInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: E. A. Samusik (e.samusik@mail.ru)*

Studies of sod-podzolic soils of forest and agricultural lands in the zone of impact of the enterprise for the production of building materials have shown that gas and dust emissions significantly affect the content of heavy metals in soils.

The assessment of the content of gross forms of heavy metals in sod-podzolic soils of forest and agricultural lands adjacent to the territory of JSC «Krasnoselskstroymaterialy» showed widespread soil contamination with cadmium, arsenic and zinc. Soil contamination of forest and agricultural lands with lead is fragmentary. The highest occurrence of samples with an excess of hygienic standards for soils of forest lands was established for gross forms of zinc, and for soils of agricultural lands – for gross forms of cadmium and arsenic.

The assessment of mobile forms of metals revealed soil contamination mainly with zinc and lead. Soil contamination with cadmium is insignificant and is fragmentary. It should be noted that the sod-podzolic soils of agricultural lands in the north-eastern direction from the enterprise are characterized by a high level of contamination with mobile forms of zinc and lead.

The studies did not reveal an excess of the maximum permissible safe levels of cadmium and lead content in wheat grain and straw, however, the maximum concentrations of these elements in plants of this crop were on average 25–60 % higher in some areas compared to those in control areas, which indicates the presence of local zones in which there is an increased accumulation of heavy metals in agricultural plants. In this regard, it is necessary to organize monitoring of the quality of crop production for the content of heavy metals in the zone of influence of JSC «Krasnoselskstroymaterialy».

Keywords: production of building materials; heavy metals; bulk and mobile forms of metals; background content; hygienic standards; sod-podzolic soils; plant products.

Введение

Отличительной особенностью загрязнения почв в зоне воздействия промышленных объектов является накопление в них многокомпонентной смеси химических веществ различной природы. Особое место занимают тяжелые металлы.

Тяжелые металлы, присутствующие в сырье или отходах производства, участвуют в водной и воздушной миграции и могут являться источником химического загрязнения почв преимущественно близлежащих к промышленным объектам территорий, формируя локальные участки загрязнения земель. Элементы, содержащиеся в промышленных выбросах, распространяются на значительные расстояния, формируя педогеохимические аномалии, удаленные от непосредственного источника выброса, что затрудняет его идентификацию [1].

Традиционно в практике оценки химического загрязнения земель используется определение в почвах валовых концентраций тяжелых металлов. Однако валовое содержание отражает только общую картину накопления в землях элементов или их соединений и не всегда свидетельствует об опасности химического загрязнения почв, так как при этом не учитывается миграционная активность поллютантов и возможность

их поступления в другие компоненты природной среды. Более информативным при оценке загрязнения почв является анализ содержания подвижных форм металлов, дающий возможность оценить степень опасности избыточной концентрации элементов в почвах для экосистем и их отдельных компонентов [1].

Цель исследования – оценить содержание валовых и подвижных форм тяжелых металлов (кадмия, мышьяка, цинка, свинца и меди) в дерново-подзолистой почве сельскохозяйственных и лесных земель, а также в растениеводческой продукции, произрастающей на сельскохозяйственных землях, на разном расстоянии (в градиенте расстояния) и по различным направлениям от предприятия по производству строительных материалов.

Материалы и методы исследования

В настоящее время цементная промышленность Беларуси представлена тремя предприятиями (ОАО «Красносельскстройматериалы», ОАО «Белорусский цементный завод» и ОАО «Кричевцементношифер»), из которых ОАО «Красносельскстройматериалы» (Гродненская обл., Волковысский р-н, г. п. Красносельский) является крупнейшим предприятием страны, специализирующемся на производстве цемента, известковых материалов и асбестоцементных изделий.

На территории г. п. Красносельский, по данным многолетних метеорологических наблюдений, в теплый период года преобладают ветры северо-западных, северных, западных и юго-западных составляющих. Характер распределения направления ветра хорошо иллюстрируется в виде так называемых роз-диаграмм. На рис. 1 указано направление ветра за январь и июль, а также в течение года в районе расположения предприятия ОАО «Красносельскстройматериалы», что соответствует средним многолетним данным ГУ «Гродненский областной центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»¹.

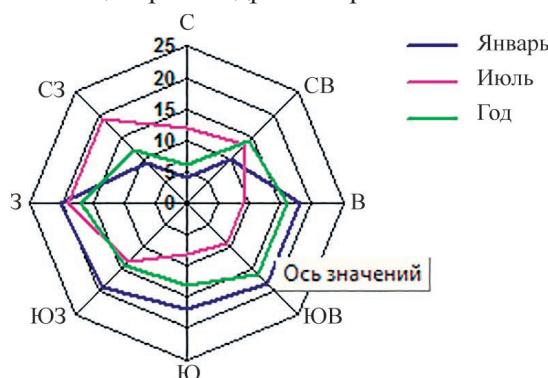


Рис. 1. График среднемноголетней повторяемости ветра в районе расположения предприятия ОАО «Красносельскстройматериалы»

Fig. 1. The graph of the average long-term frequency of wind in the area of the location of the enterprise of JSC «Krasnoselskstroymaterialy»

Почвенный покров исследуемой территории представлен дерново-подзолистыми песчаными почвами на моренных связных песках и дерново-подзолистыми супесчаными почвами на моренных пылевато-песчаных рыхлых супесях.

Пробные площадки были заложены по четырем направлениям (СЗ, ЮВ, ЮЗ, СВ) по ранее намеченному маршруту с учетом годовой «розы ветров», определяющей перенос загрязняющих веществ воздушными потоками. Расстояния от источника загрязнения до места отбора почвенных образцов по основным направлениям составили 1 км, 1,5; 2,5; 3,5; 6,5; 8 и 15 км. Фоновым участком являлась территория, расположенная в удаленности от источника загрязнения в радиусе 15 км.

Отбор почвенных образцов проводился из горизонта 0–20 см с помощью почвенного бура со строго фиксированной глубиной отбора по методическим указаниям². Всего отобрано 66 проб почв (на лесных и сельскохозяйственных землях).

¹Оценка воздействия на окружающую среду по объекту «Реконструкция помольного отделения на филиале № 3 «Известковый завод» ОАО «Красносельскстройматериалы»: отчет о НИР (заключ.) URL: <https://volkovysk.grodno-region.by/uploads/files/ovos-Krasnoselskstroymaterialy.pdf>. (дата обращения: 15.09.2021).

²ТКП 17.03-02-2013 (02120). Правила и порядок определения загрязнения земель (включая почвы) химическими веществами: утвержд. и введ. в действие постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 29 ноября 2013 г. № 9-Т.

Химико-аналитические испытания проб почв на содержание тяжелых металлов проводились методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Для всех почвенных образцов проводилось определение валовых и подвижных форм кадмия, мышьяка, цинка, свинца и меди.

Для проведения химико-аналитических исследований отобранные образцы почвы высушивались до воздушно-сухого состояния, просеивались через сито 1 мм.

В зоне воздействия предприятия по производству строительных материалов на сельскохозяйственных землях также было проведено выборочное обследование растительных образцов (зерновая культура – яровая пшеница). Всего было отобрано 22 образца растения. Растения отбирали в фазу восковой спелости.

Процедура извлечения валовых форм тяжелых металлов из почвенных и растительных образцов проводилась методом кислотного разложения ($5M\ HNO_3$ и $1M\ HNO_3$). Определение подвижных форм металлов проводилось из вытяжки ацетатно-аммонийного буфера (ААБ, pH 4,8) [2].

Для оценки современного состояния почв и растений использовались фактические значения содержания в них химических веществ, коэффициент аномальности Ка (отношение содержания химического вещества в исследованном объекте к местному геохимическому фону), гигиенические нормативы для почв³ и допустимые уровни безопасности для растений^{4, 5}.

В качестве фона для валовых форм тяжелых металлов использованы значения содержания химических веществ в почвах фоновых территорий Гродненской обл. (по данным НСМОС)⁶, для подвижных форм – выводы по наблюдениям за химическим загрязнением земель на фоновых территориях⁷.

В настоящее время в природоохранной практике Республики Беларусь разработаны и используются дифференцированные нормативы содержания валовых форм химических веществ в почвах (ЭкоНиП 17.03.01-001-2020)⁸. В тоже время, поскольку цель настоящих исследований заключалась в оценке содержания не только валовых, но и подвижных форм изучаемых элементов в почве, а также накопление этих элементов в растениях пшеницы, для оценки полученных результатов были использованы гигиенические нормативы (предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочные допустимые концентрации (ОДК) для валовых и подвижных форм тяжелых металлов в почвах), которые длительное время применялись в геохимических исследованиях для оценки опасности накопления поллютантов в природных средах и которые с научной точки зрения отражают цель настоящих исследований.

Результаты исследования и их обсуждение

Основным сырьем для производства портландцементного клинкера являются *карбонатные* (известняки, мел, известковый мергель) и *глинистые* (глина, суглинки, лесс) породы, а также *железистое сырье* (железистые руды, пиритные огарки). Основными источниками эмиссии пыли и тяжелых металлов (в частности, Zn и Pb) в окружающую среду при производстве строительных материалов являются высокотемпературные технологические процессы при производстве цемента (вращающиеся печи обжига клинкера и мельницы помола). При этом на долю обжиговых печей приходится до 70–80 % выбрасываемой пыли. Мощным источником поступления техногенного кадмия является процесс сжигания топлива (угля, шин) [3].

По данным [4], основное количество тяжелых металлов в производственный процесс вносится с техногенными добавками и, прежде всего, с пиритными огарками, с целью регулирования технологических, строительно-технических (Zn – 84,6–91,0 %, Cd – 55,5–67,0 %, Pb – 87,6–89,6 %) и основным сырьем (глиной, мелом) (Zn – 8,8–15,0 %, Cd – 28,3–44,0 %, Pb – 10,2–12,2 %).

Результаты этих же исследований [4] указывают на высокие концентрации данных элементов в пыли, образующейся при производстве цемента. Так, содержание кадмия может варьировать от 0,21 до 219,1 мг/кг, свинца – 642–3728,9 мг/кг, цинка – от 160 до 690,5 мг/кг.

³Гигиенический норматив «Показатели безопасности и безвредности почвы». Утвержден постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 25 января 2021 г. № 37.

⁴Гигиенический норматив «Показатель безопасности и безвредности для человека продовольственного сырья и продуктов питания». Утвержден постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 21 июня 2013 г. № 52.

⁵Ветеринарно-санитарные правила обеспечения в ветеринарно-санитарном отношении кормов и кормовых добавок. Постановление Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 5 февраля 2018 г. № 9.

⁶Экологический бюллетень за 2015 год : земельные ресурсы и почвы. URL: <https://minpriroda.gov.by/ru/ecoza2015> (дата обращения: 15.09.2021).

⁷Экологический бюллетень за 2010 год : земельные ресурсы и почвы. URL: https://minpriroda.gov.by/ru/new_url_2108832364-ru (дата обращения: 15.09.2021).

⁸ЭкоНиП 17.03.01-001-2020. Охрана окружающей среды и природопользование. Земли (в том числе почвы). Нормативы качества окружающей среды. Дифференцированные нормативы содержания химических веществ в почвах.

Исследования валового содержания тяжелых металлов в почвах лесных и сельскохозяйственных земель на разном расстоянии и по различным направлениям от источника загрязнения представлены на рис. 2–11.

Оценка валового содержания кадмия в почвенном покрове показала, что средние концентрации валовых форм элемента в почвах сельскохозяйственных и лесных земель во всех направлениях превышали геохимический фон по Гродненской обл. с коэффициентом аномальности 5,4 и 4,5 соответственно [5].

Содержание кадмия в почвах лесных земель изменяется в широком диапазоне от 0,1 до 1,85 мг/кг (рис. 2, а), в почвах сельскохозяйственных земель – от 0,12 до 1,59 мг/кг (рис. 3, а). При этом наиболее высокие концентрации валовых форм кадмия зафиксированы в почвах лесных земель юго-восточного направления, где содержание элемента составляет 1,85 мг/кг и превышает гигиенический норматив в 3,7 раза (рис. 2, б) [5]. В почвах сельскохозяйственных земель высокие концентрации валовых форм кадмия выявлены по всем направлениям, которые превышают ОДК в 1,9–3,2 раза (рис. 3, б). Следует отметить, что высокое содержание валовых форм кадмия обнаруживается повсеместно в радиусе 8 км от источника загрязнения как в почвах сельскохозяйственных, так и в лесных землях.

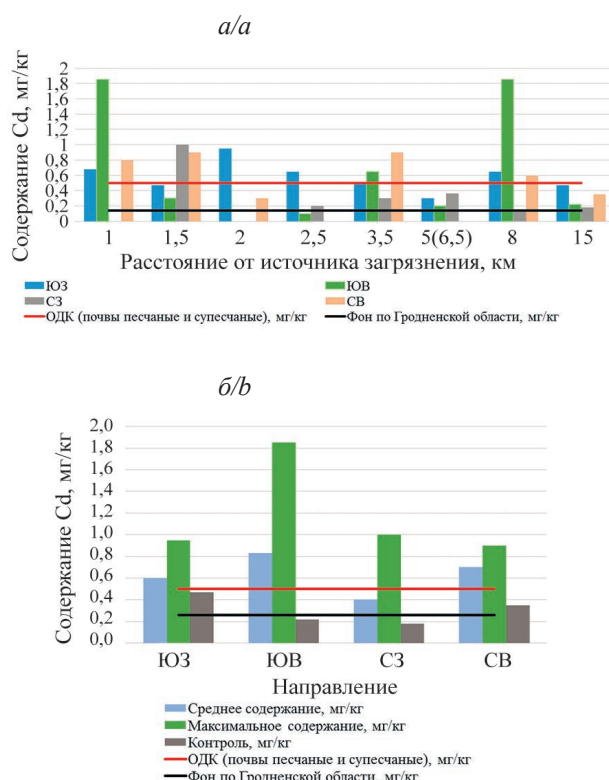


Рис. 2. Фактическое валовое содержание Cd в дерново-подзолистых почвах лесных земель в градиенте расстояния от источника загрязнения (а) и по направлениям (б)

Fig. 2. Actual gross Cd content in soddy-podzolic soils of forest lands in the gradient of distance from the pollution source (a) and along the directions (b)

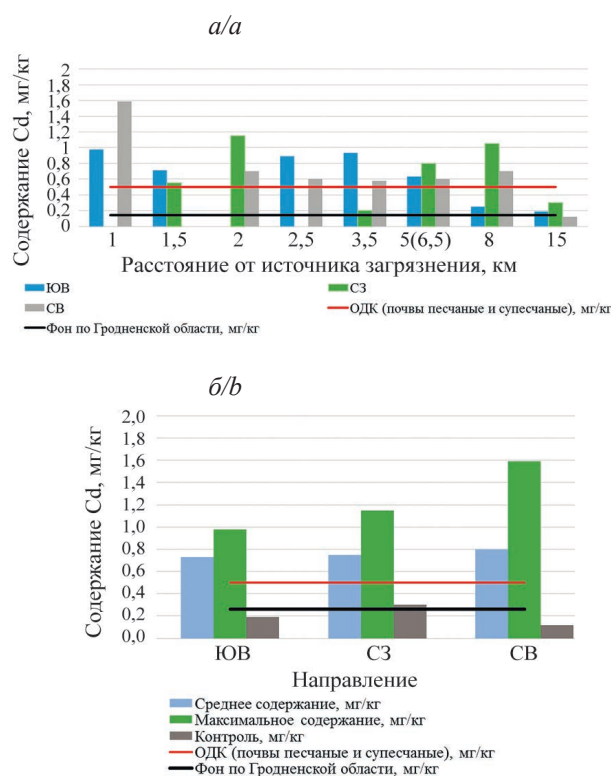


Рис. 3. Фактическое валовое содержание Cd в дерново-подзолистых почвах сельскохозяйственных земель в градиенте расстояния от источника загрязнения (а) и по направлениям (б)

Fig. 3. Actual gross content of Cd in soddy-podzolic soils of agricultural lands in the gradient of distance from the pollution source (a) and along the directions (b)

Анализ валового содержания мышьяка в почвах свидетельствует, что средние концентрации элемента в почвах сельскохозяйственных земель северо-западного и северо-восточного направлений превышали местный геохимический фон для Гродненской обл. с коэффициентом аномальности 3,1 и 2,6 соответственно, для почв лесных земель юго-западного и юго-восточного направлений – $K_a = 3,3$ и $3,1$ соответственно.

Содержание мышьяка в почвах лесных земель изменяется в широком диапазоне от 0,5 до 11,5 мг/кг (рис. 4, а), в почвах сельскохозяйственных земель – от 0,1 до 8 мг/кг (рис. 5, а). Наиболее высокие концентрации валовых форм кадмия зафиксированы в почвах лесных земель юго-западного и юго-восточного направлений, где содержание элемента составляет 9,98 мг/кг и 11,5 мг/кг, что превышает гигиенический норматив в 5 и 5,8 раза соответственно (рис. 4, б). В почвах сельскохозяйственных земель

северо-западного и северо-восточного направлений выявлены высокие концентрации валовых форм мышьяка с превышением ПДК в 4 и 3,5 раза соответственно (рис. 5, б). Отмечено, что высокое содержание валовых форм кадмия обнаруживается повсеместно в радиусе 8 км от источника загрязнения в почвах сельскохозяйственных земель, в почвах лесных земель – в радиусе 2,5 км.

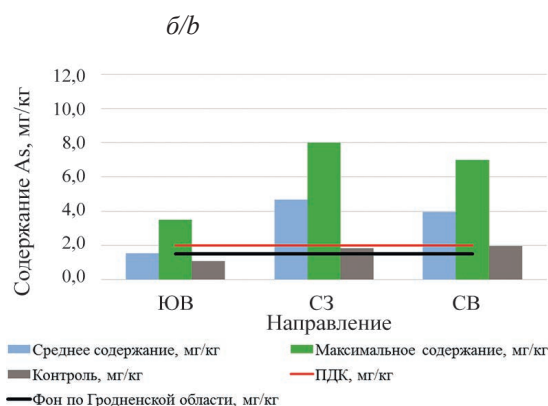
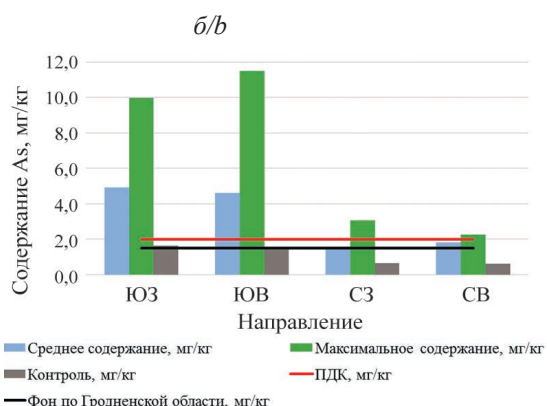
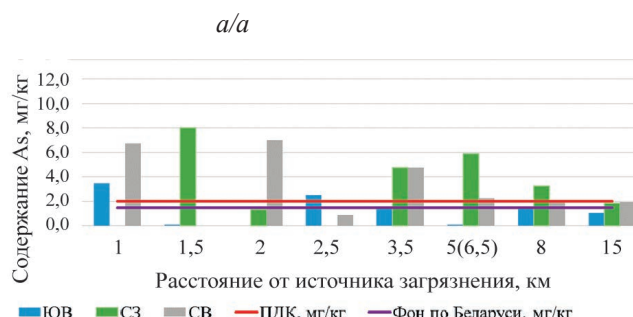
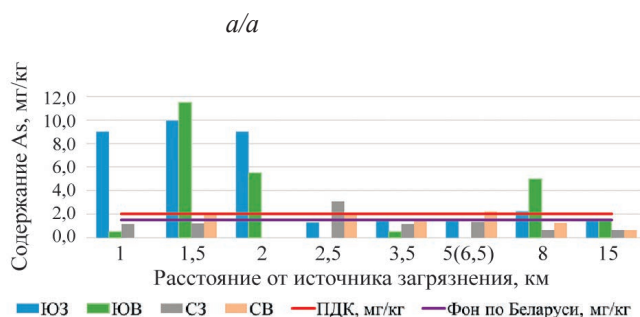


Рис. 4. Фактическое валовое содержание As в дерново-подзолистых почвах лесных земель в градиенте расстояния от источника загрязнения (а) и по направлениям (б)

Рис. 5. Фактическое валовое содержание As в дерново-подзолистых почвах сельскохозяйственных земель в градиенте расстояния от источника загрязнения (а) и по направлениям (б)

Fig. 4. Actual gross As content in soddy-podzolic soils of forest lands in the gradient of distance from the pollution source (a) and along the directions (b)

Fig. 5. Actual gross As content in soddy-podzolic soils of agricultural lands in the gradient of distance from the pollution source (a) and along the directions (b)

Обнаружено, что средние концентрации валовых форм цинка в почвах сельскохозяйственных и лесных земель во всех направлениях превышали местный геохимический фон с коэффициентом аномальности 1,8 и 2,7 соответственно (рис. 6, а, 7, а).

При этом содержание цинка в почвах лесных земель значительно выше, чем в почвах сельскохозяйственных земель и составляет 56,8 мг/кг и 37,4 мг/кг соответственно. Наиболее высокие концентрации валовых форм цинка зафиксированы в почвах лесных земель северо-западного и северо-восточного направлений, где содержание элемента составляет 100,5 мг/кг и 74,5 мг/кг, что превышает ОДК в 1,8 и 1,4 раза соответственно. В почвах сельскохозяйственных земель лишь северо-восточного направления выявлены высокие концентрации валовых форм цинка с превышением ОДК в 1,9 раза. Отмечено, что высокое содержание цинка обнаруживается повсеместно в радиусе 8 км от источника загрязнения как в почвах лесных, так и почвах сельскохозяйственных земель (рис. 6, б, 7, б).

Сравнительный анализ содержания валовых форм свинца в почвах лесных и сельскохозяйственных земель выявил повсеместное накопление данного элемента во всех направлениях. Средние концентрации валовых форм свинца в почвах сельскохозяйственных и лесных земель превышали местный геохимический фон с коэффициентом аномальности 2,0 и 2,5 соответственно (рис. 8, а, 9, а).

При этом среднее содержание свинца в почвах лесных и сельскохозяйственных земель составляло 15,0 мг/кг и 17,0 мг/кг соответственно. Наиболее высокие концентрации валовых форм свинца зафиксированы в почвах лесных земель юго- и северо-западного, юго-восточного направлений, где содержание элемента в среднем составляет 34,9 мг/кг, что превышает гигиенический норматив в 1,1 раза (рис. 8, б). В почвах сельскохозяйственных земель лишь северо-восточного направления выявлены высокие концентрации валовых форм свинца, и превышает ПДК в 1,5 раза (рис. 9, б).

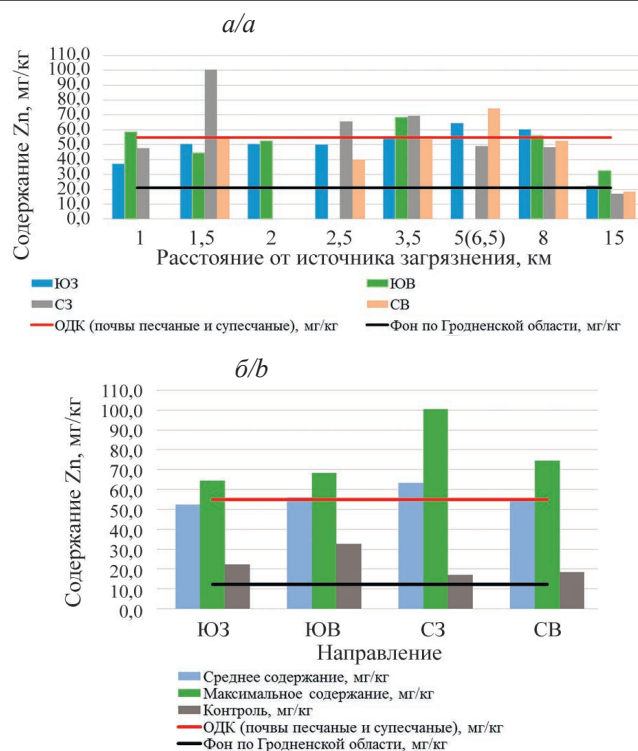


Рис. 6. Фактическое валовое содержание Zn в дерново-подзолистых почвах лесных земель в градиенте расстояния от источника (а) загрязнения и по направлениям (б)

Fig. 6. Actual gross Zn content in soddy-podzolic soils of forest lands in the gradient of distance from the pollution (a) source and along the directions (b)

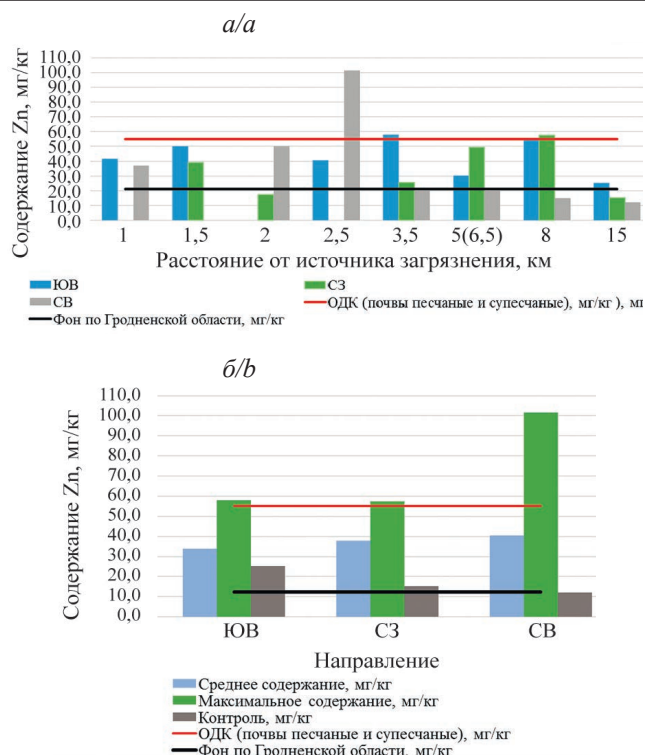


Рис. 7. Фактическое валовое содержание Zn в дерново-подзолистых почвах сельскохозяйственных земель в градиенте расстояния от источника (а) загрязнения и по направлениям (б)

Fig. 7. Actual gross content of Zn in soddy-podzolic soils of agricultural lands in the gradient of distance from the source (a) of pollution and in directions (b)

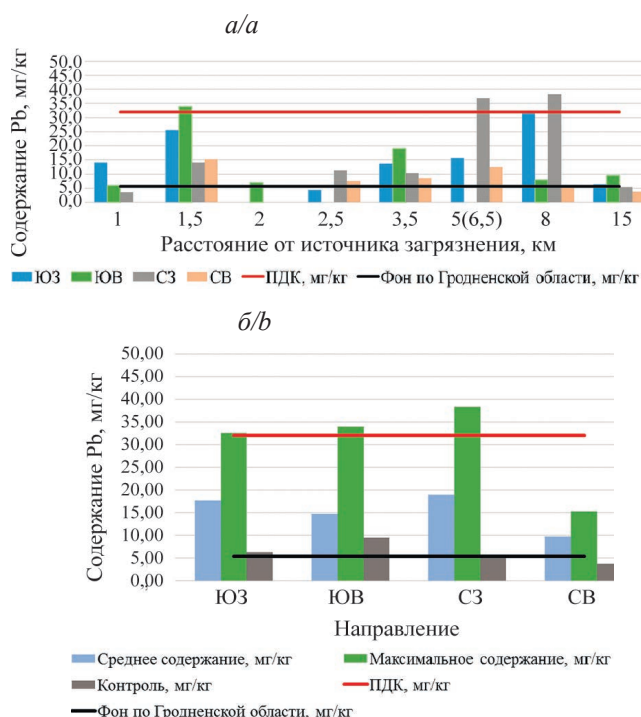


Рис. 8. Фактическое валовое содержание Pb в дерново-подзолистых почвах лесных земель в градиенте расстояния от источника (а) загрязнения и по направлениям (б)

Fig. 8. Actual gross Pb content in soddy-podzolic soils of forest lands in the gradient of distance from the pollution source (a) and along the directions (b)

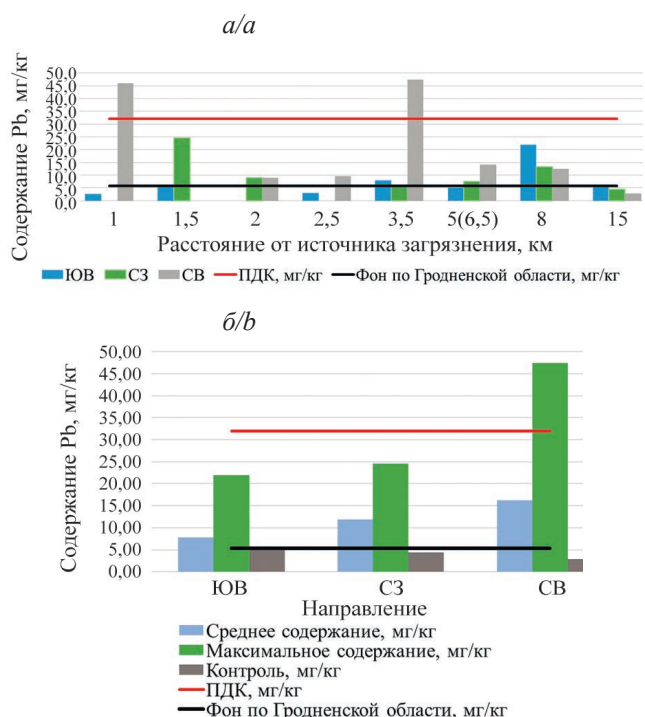


Рис. 9. Фактическое валовое содержание Pb в дерново-подзолистых почвах сельскохозяйственных земель в градиенте расстояния от источника загрязнения (а) и по направлениям (б)

Fig. 9. Actual gross Pb content in soddy-podzolic soils of agricultural lands in the gradient of distance from the source (a) of pollution and in directions (b)

Средние концентрации валовых форм меди в почвах сельскохозяйственных земель лишь северо-восточного направления превышают местный геохимический фон с коэффициентом аномальности 2,9. При этом содержание меди в почвах лесных земель варьирует в диапазоне от 1,3 до 9,5 мг/кг (рис. 10, а, б), в почвах сельскохозяйственных земель – 1,5–10,7 мг/кг (рис. 11, а). Наиболее высокие концентрации валовых форм меди зафиксированы лишь в почвах сельскохозяйственных земель северо-восточного направления, где содержание элемента составляет 38,3 мг/кг, что превышает ОДК в 1,2 раза (рис. 11, б).

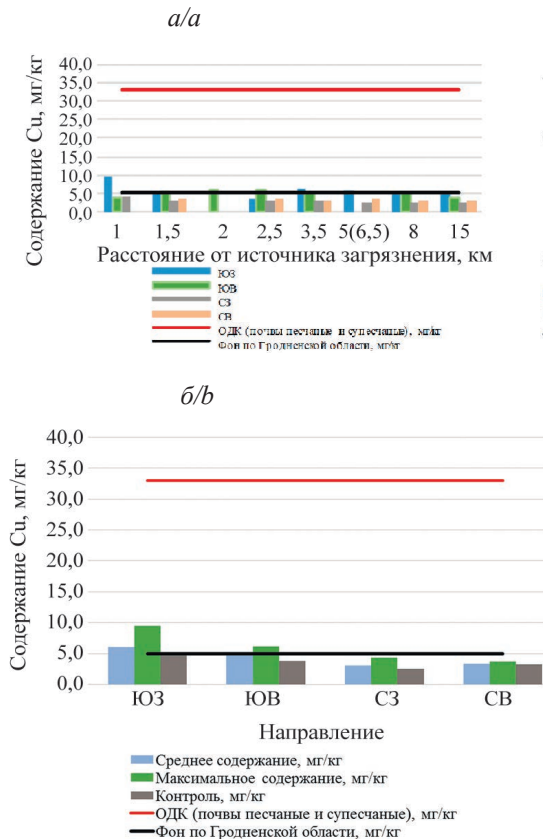


Рис. 10. Фактическое валовое содержание Cu в дерново-подзолистых почвах лесных земель в градиенте расстояния от источника загрязнения (а) и по направлениям (б)

Fig. 10. Actual gross Cu content in soddy-podzolic soils of forest lands in the gradient of distance from the pollution (a) source and along the directions (b)

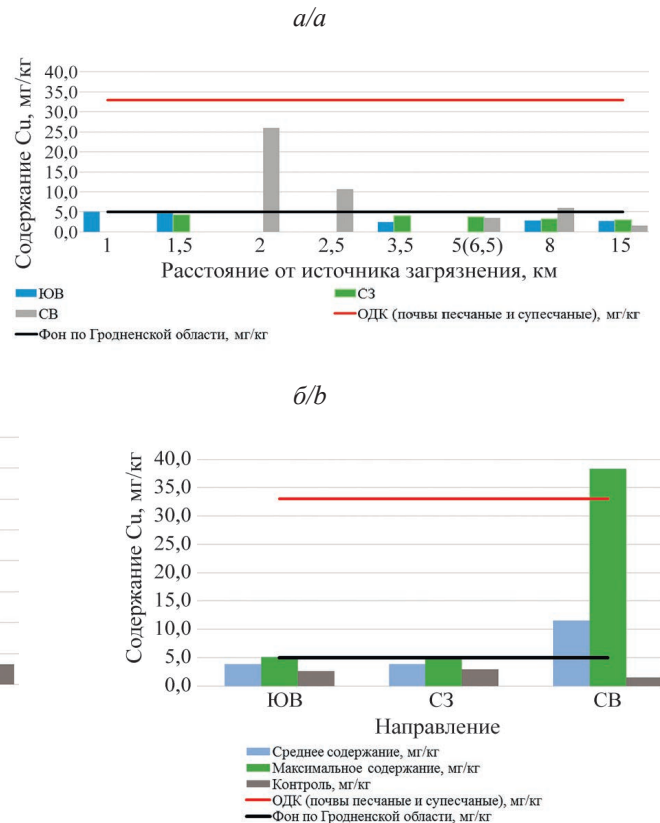


Рис. 11. Фактическое валовое содержание Cu в дерново-подзолистых почвах сельскохозяйственных земель в градиенте расстояния от источника загрязнения (а) и по направлениям (б)

Fig. 11. Actual gross Cu content in soddy-podzolic soils of agricultural lands in the gradient of distance from the pollution source (a) and along the directions (b)

В 80 % случаев почвы сельскохозяйственных угодий северо-западного и северо-восточного направлений загрязнены кадмием с наибольшим значением, равным 2,3 ОДК и 3,2 ОДК; мышьяком с максимальным значением, равным 4 ПДК и 3,5 ПДК соответственно. В 50 % случаев почвы лесных земель юго-восточного направления загрязнены кадмием с наибольшим значением – 3,7 ОДК и мышьяком – 5,8 ПДК. Содержание валовых форм меди не превышало установленных нормативов в почвах лесных земель во всех направлениях, однако в 17 % случаев почвы сельскохозяйственных земель северо-восточного направления загрязнены медью с наибольшим значением, равным 1,2 ОДК (см. таблицу).

Сравнение валовых концентраций тяжелых металлов в дерново-подзолистых почвах лесных и сельскохозяйственных земель с фоновыми значениями, проведенных на территории Гродненской обл., позволяет констатировать загрязнение почв преимущественно кадмием, мышьяком, цинком и свинцом.

Исследования подвижных форм металлов в дерново-подзолистых почвах сельскохозяйственных земель, прилегающих к предприятию по производству строительных материалов, выявили интенсивное накопление в почве кадмия, цинка и свинца, а в дерново-подзолистых почвах лесных земель – лишь цинка и свинца.

В почвах сельскохозяйственных земель юго- и северо-восточного, северо-западного направлений максимальные концентрации подвижного кадмия превышают фон в 2,7 раз, 7,6 и 1,9 раза соответственно (рис. 12).

Основные статистические параметры содержания валовых форм тяжелых металлов в почвах, прилегающих к цементному предприятию по направлениям

The main statistical parameters of the content of gross forms of heavy metals in the soils adjacent to the cement enterprise in the following directions

Химический элемент	Направление	В почвах лесных земель	В почвах сельскохозяйственных земель*
Cd	Юго-запад	1,9/57**	
	Юго-восток	3,7/43	1,9/83
	Северо-запад	2,0/20	2,3/80
	Северо-восток	1,8/80	3,2/80
As	Юго-запад	5,0/57	
	Юго-восток	5,8/50	1,8/33
	Северо-запад	1,5/20	4,0/80
	Северо-восток	1,1/40	3,5/80
Zn	Юго-запад	1,2/29	–
	Юго-восток	1,3/50	1,1/33
	Северо-запад	1,8/60	1,1/20
	Северо-восток	1,4/80	1,9/17
Pb	Юго-запад	1,0/14	
	Юго-восток	1,1/17	–
	Северо-запад	1,2/40	–
	Северо-восток	–	1,5/33
Cu	Юго-запад	–	
	Юго-восток	–	–
	Северо-запад	–	–
	Северо-восток	–	1,2/17

Примечание. *Химико-аналитические испытания проб почв сельскохозяйственных земель юго-западного направления на содержание валовых форм тяжелых металлов не осуществлялись в связи с неоднородностью рельефа; ** в числителе – максимальная кратность превышения гигиенического норматива (разы), в знаменателе – встречаемость значений выше ПДК (ОДК) (%).

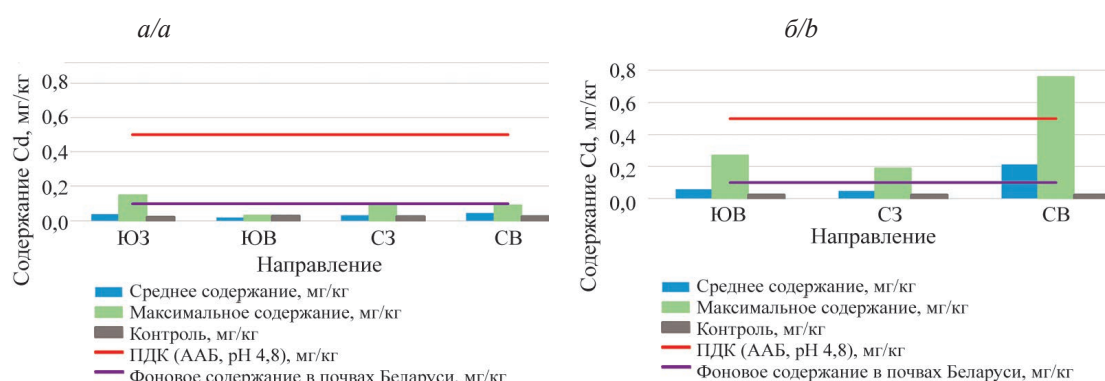


Рис. 12. Фактическое содержание подвижных форм Cd в дерново-подзолистых почвах лесных (а) и сельскохозяйственных земель (б) по направлениям

Fig. 12. Actual content of mobile forms of Cd in soddy-podzolic soils of forest (a) and agricultural lands (b) by directions

Максимальные концентрации подвижного цинка и свинца обнаружены в дерново-подзолистых почвах сельскохозяйственных земель северо-восточного направления, где превышение фона составило в 13,3 и 21,6 раза соответственно (рис. 13, 14). В частности, отмечено повсеместное превышение среднего содержания подвижного цинка над фоном в почвах лесных земель в 1,0–2,4 раза.

Количество подвижных форм свинца в почвах лесных земель во всех направлениях изменялось в диапазоне от 0,4 до 3,5 мг/кг. При этом зафиксированы превышения концентраций подвижного свинца в почвах лесных земель над фоновым значением во всех направлениях в 1,8–2,9 раза (рис. 14).

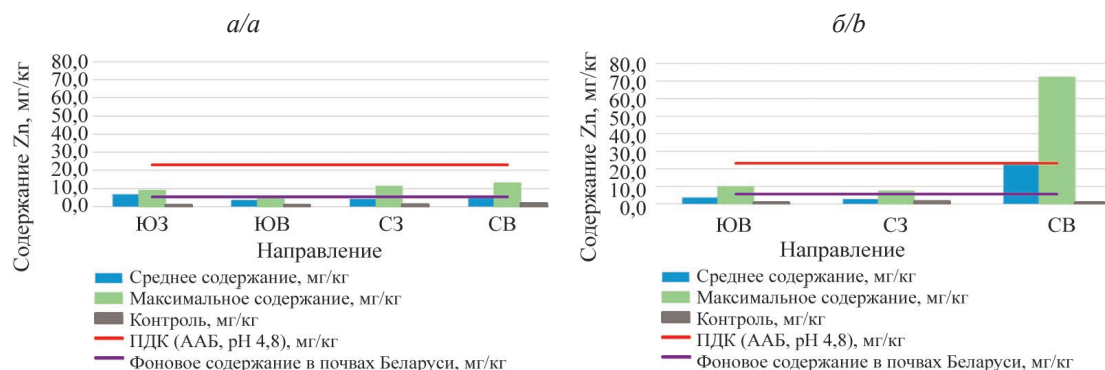


Рис. 13. Фактическое содержание подвижных форм Zn в дерново-подзолистых почвах лесных (а) и сельскохозяйственных земель (б) по направлениям

Fig. 13. Actual content of mobile forms of Zn in soddy-podzolic soils of forest (a) and agricultural lands (b) by directions

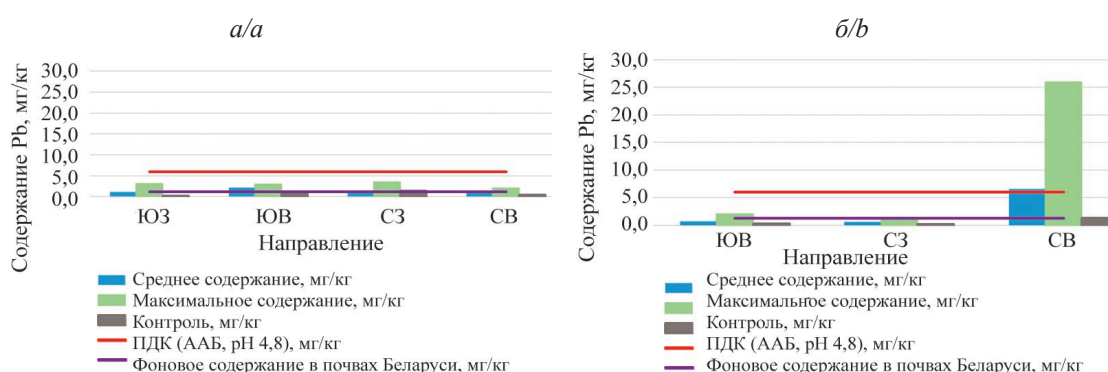


Рис. 14. Фактическое содержание подвижных форм Pb в дерново-подзолистых почвах лесных (а) и сельскохозяйственных земель (б) по направлениям

Fig. 14. Actual content of mobile forms of Pb in soddy-podzolic soils of forest (a) and agricultural lands (b) by directions

Сравнение полученных данных с гигиеническими нормативами [9] показало, что 17 % проб почв сельскохозяйственных земель северо-восточного направления загрязнены подвижным кадмием с наибольшим значением, равным 1,5 ПДК; цинком – 3,1 ПДК и свинцом – 4,3 ПДК.

Для подвижного мышьяка и меди превышения над гигиеническими нормативами, разработанными для сельскохозяйственных земель, не зафиксированы (рис. 15, 16).

Сравнение концентраций подвижных форм металлов в дерново-подзолистых почвах лесных и сельскохозяйственных земель с фоновыми значениями, осуществленных на территории Гродненской обл., позволяет констатировать загрязнение почв преимущественно свинцом. При этом наибольшая доля почв сельскохозяйственных угодий, загрязненных кадмием, цинком и свинцом, с концентрацией выше фона установлена для северо-восточного направления.

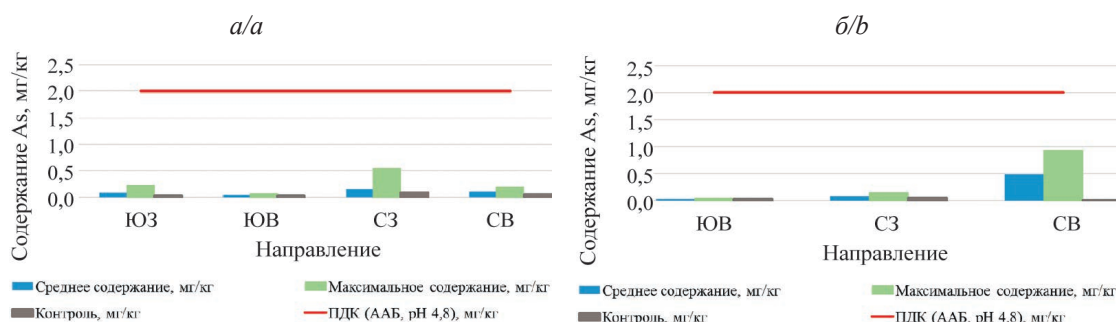


Рис. 15. Фактическое содержание подвижных форм As в дерново-подзолистых почвах лесных (а) и сельскохозяйственных земель (б) по направлениям

Fig. 15. The actual content of mobile As forms in soddy-podzolic soils of forest (a) and agricultural lands (b) by directions

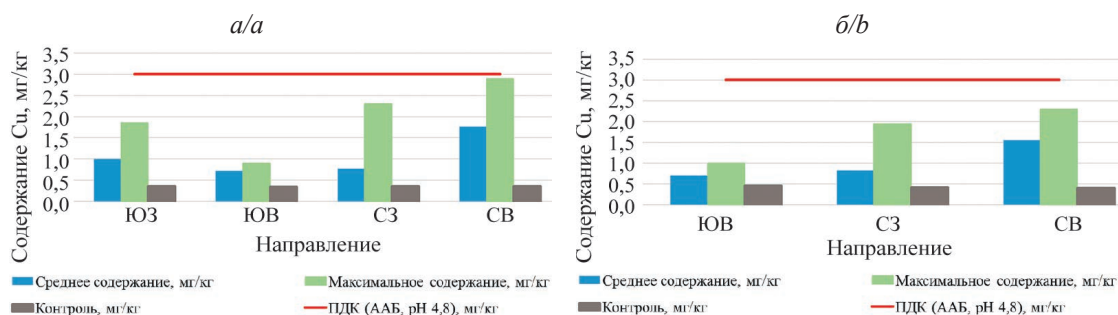


Рис. 16. Фактическое содержание подвижных форм Cu в дерново-подзолистых почвах лесных (а) и сельскохозяйственных земель (б) по направлениям

Fig. 16. The actual content of mobile forms of Cu in soddy-podzolic soils of forest (a) and agricultural lands (b) by directions

По степени подвижности в дерново-подзолистых почвах сельскохозяйственных земель изучаемые тяжелые металлы располагаются в следующем порядке (по убыванию): Zn (30,3 %) > Cd (27,6 %) > Pb (24,9 %) > Cu (22,7 %) > As (7,6 %); в лесных землях – Cu (27 %) > Pb (15,4 %) > Zn (8,7 %) > Cd (8,6 %) > As (6,6 %). Наименьшей подвижностью в почвах сельскохозяйственных и лесных земель во всех направлениях отличается мышьяк.

Исследования также показали высокое процентное соотношение подвижных форм кадмия, цинка и свинца от их валовой концентрации в дерново-подзолистых почвах сельскохозяйственных земель северо-восточного направления. В частности, максимальная доля подвижных форм кадмия в почве составляет 76 % (в 60 % случаев), цинка – 86,9 % (в 50 %) и свинца – 96,2 % (в 33 % случаев).

Результаты корреляционного анализа показали наличие достоверной прямой средней корреляционной зависимости между подвижными и валовыми формами цинка и меди ($r=0,49$ и $r=0,58$, $p < 0,05$) в почвах лесных земель, высокой корреляционной зависимости для цинка в почвах юго-восточного направления ($r=0,94$) и меди в почвах северо-восточного направления ($r=0,84$). Для почв сельскохозяйственных земель выявлены достоверные взаимосвязи для мышьяка, свинца и меди (в диапазоне $r=0,45–0,58$, $p < 0,05$): с наибольшими коэффициентами корреляции для мышьяка в почвах юго-восточного направления ($r=0,80$), для свинца в почвах северо-восточного направления ($r=0,75$) и для меди в почвах северо-западного направления ($r=0,94$). Следует также отметить наличие высокой корреляционной связи для цинка в почвах сельскохозяйственных земель северо- и юго-восточного направления ($r=0,85$ и $r=0,86$, при $p < 0,05$). Повышенное содержание подвижных форм кадмия, цинка и свинца в исследуемых почвах может свидетельствовать о техногенном факторе их накопления.

В местах отбора почвенных образцов с высоким содержанием валовых форм тяжелых металлов были отобраны растительные образцы. Результаты анализа растительной продукции на содержание тяжелых металлов (Cd, Pb) и оценка ее по гигиеническим нормативам безопасности и безвредности для человека продовольственного сырья и продуктов питания [6] показали, что превышения максимальных допустимых уровней свинца и кадмия в зерне пшеницы не наблюдались (рис. 17, 18).

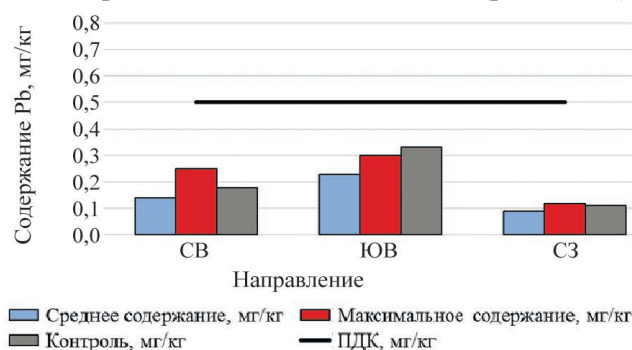


Рис. 17. Накопление свинца в зерне пшеницы, произрастающей на дерново-подзолистой супесчаной почве, мг/кг в.-с. массы

Fig. 17. Accumulation of lead in wheat grain growing on sod-podzolic sandy loam soil, mg/kg

Результаты анализа соломы пшеницы на содержание Pb, Cd и оценка ее в соответствии с ветеринарно-санитарными правилами обеспечения безопасности в отношении кормов и кормовых добавок [7] показали отсутствие превышения установленных нормативов (рис. 19, 20).

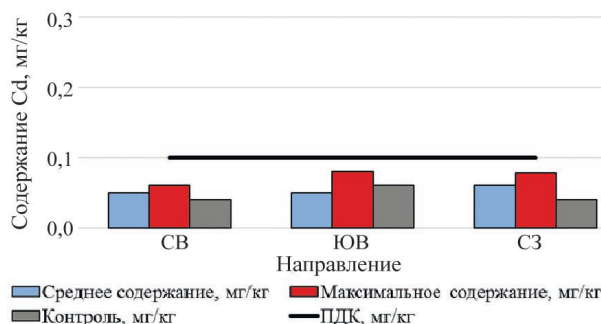


Рис. 18. Накопление кадмия в зерне пшеницы, произрастающей на дерново-подзолистой супесчаной почве, мг/кг

Fig. 18. Accumulation of cadmium in wheat grain growing on sod-podzolic sandy loam soil, mg/kg

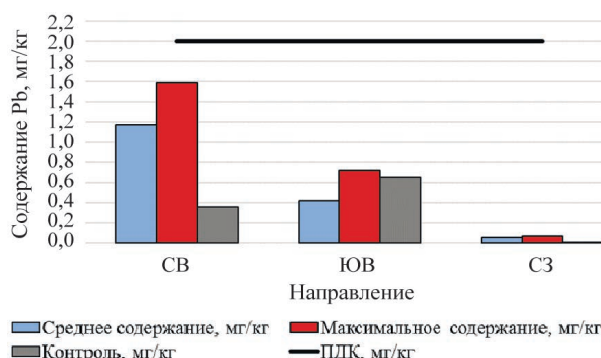


Рис. 19. Накопление свинца в соломе пшеницы, произрастающей на дерново-подзолистой супесчаной почве, мг/кг

Fig. 19. Accumulation of lead in wheat straw growing on sod-podzolic sandy loam soil, mg/kg

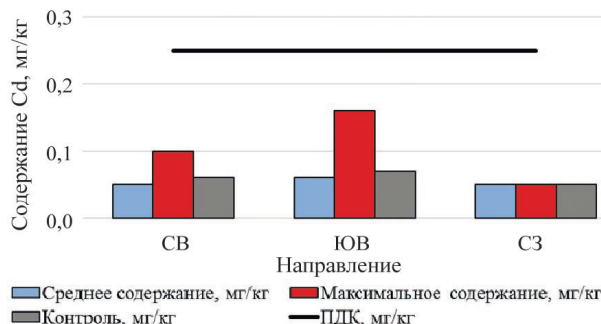


Рис. 20. Накопление кадмия в соломе пшеницы, произрастающей на дерново-подзолистой супесчаной почве, мг/кг

Fig. 20. Accumulation of cadmium in wheat straw growing on sod-podzolic sandy loam soil, mg/kg

Несмотря на то, что не были выявлены превышения максимально допустимых безопасных уровней содержания кадмия и свинца в зерне и соломе пшеницы, максимальные концентрации этих элементов в данной культуре на некоторых участках в среднем на 25–60 % выше по сравнению с контрольными участками. Это указывает на наличие локальных зон, в которых наблюдается повышенное накопление тяжелых металлов в сельскохозяйственных растениях. Следовательно, в зоне воздействия ОАО «Красносельскстройматериалы» необходимо организовать мониторинг качества растениеводческой продукции на содержание тяжелых металлов.

Заключение

Исследования дерново-подзолистых почв лесных и сельскохозяйственных земель в зоне воздействия предприятия по производству строительных материалов показали, что газопылевые выбросы существенно влияют на содержание тяжелых металлов в почвах и растениях пшеницы. Оценка содержания валовых форм тяжелых металлов в дерново-подзолистых почвах лесных и сельскохозяйственных земель, прилегающих к территории ОАО «Красносельскстройматериалы», показала полиэлементное загрязнение почв

кадмием, мышьяком и цинком. Загрязнение почв лесных и сельскохозяйственных земель свинцом носит фрагментарный характер: в почвах лесных земель северо-западного направления возможно обусловлено выбросами выхлопных газов машин, а в почвах сельскохозяйственных земель северо-восточного направления – выбросами грузовой техники, осуществляющей транспортировку мела с карьера.

Наибольшая встречаемость проб с превышением гигиенических нормативов для почв лесных земель установлена для валовых форм цинка, а для почв сельскохозяйственных земель – для валовых форм кадмия и мышьяка. Установлено высокое содержание подвижных форм цинка и свинца в почвах. Содержание подвижных форм кадмия в почвах незначительное и носит фрагментарный характер. Следует отметить, что дерново-подзолистые почвы сельскохозяйственных земель в северо-восточном направлении от предприятия характеризуются высоким уровнем содержания подвижных форм цинка и свинца.

Результаты корреляционного анализа содержания валовых и подвижных форм элементов в почвах лесных земель показали наличие достоверной прямой средней корреляционной зависимости для цинка и меди ($r = 0,49$ и $r = 0,58$, $p < 0,05$), высокой корреляционной зависимости для цинка в почвах юго-восточного направления ($r = 0,94$) и для меди в почвах северо-восточного направления ($r = 0,84$). Для почв сельскохозяйственных земель выявлены достоверные взаимосвязи для мышьяка, свинца и меди (в диапазоне $r = 0,45–0,58$, $p < 0,05$): с наибольшими коэффициентами корреляции для мышьяка в почвах юго-восточного направления ($r = 0,80$), для свинца в почвах северо-восточного направления ($r = 0,75$) и для меди в почвах северо-западного направления ($r = 0,94$). Следует также отметить наличие достоверной высокой корреляционной связи для цинка в почвах сельскохозяйственных земель северо- и юго-восточного направления ($r = 0,85$ и $r = 0,86$, при $p < 0,05$).

В исследованиях не выявлены превышения максимально допустимых безопасных уровней содержания кадмия и свинца в зерне и соломе пшеницы, однако максимальные концентрации этих элементов в данной культуре на некоторых территориях в среднем на 25–60 % выше по сравнению с контрольными участками, что указывает на наличие локальных зон, в которых наблюдается повышенное накопление тяжелых металлов в сельскохозяйственных растениях. В этой связи в зоне воздействия ОАО «Красносельскстройматериалы» необходимо организовать мониторинг качества растениеводческой продукции на содержание тяжелых металлов.

Библиографические ссылки

1. Головатый СЕ, Савченко СВ, Самусик ЕА. Кадмий, цинк и свинец в почвах в зоне воздействия промышленных предприятий. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2017;4:70–80.
2. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных и продукции растениеводства. Москва: ЦИНАО; 1992. 61 с.
3. Кенжетаев ГЖ, Сырлыбеккызы С, Жидебаева АЕ. Экологическая оценка состояния почв в районе цементного завода «Каспий Цемент» на месторождении мела Шетпе Южное. *Вестник КазНУ. Серия экологическая*. 2019;67(4):32–44.
4. Какарека СВ, и др. *Выбросы тяжелых металлов в атмосферу: опыт оценки удельных показателей*. Минск : Институт геологических наук НАН Беларуси; 1998. 156 с.
5. Логинов ВФ, редактор. *Состояние природной среды Беларуси*. В: *Экологический бюллетень*, Минск: [б. и.]; 2014. 364 с.

References

1. Golovaty SE, Savchenko SV, Samusik EA. *Kadmiy, tsink i svinets v pochvakh v zone vozdeystviya promyshlennykh predpriyatiy* [Cadmium, zinc and lead in soils in the zone of impact of industrial enterprises]. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2017;4:70–80. Russian.
2. Methodological guidelines for the determination of heavy metals in the soils of farmland and crop production. Moscow: TSINAO, 1992. 61 p. Russian.
3. Kenzhetaev GZh, Syrlybekkyzy S, Zhidebaeva AE. Ecological assessment of the state of soils in the area of the cement plant “Caspian Cement” at the mela Shetpe Yuzhnoye deposit. *Vestnik KazNU. The series is ecological*. 2019;67(4):32–44. Russian.
4. Kakareka SV, et al. *Vybrosy tyazhelykh metallov v atmosferu: opyt otsenki udel'nykh pokazateley* [Emissions of heavy metals into the atmosphere: experience in assessing specific indicators]. Minsk: Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus; 1998. 156 p. Russian.
5. Loginov VF, editor. *Sostoianie prirodnoy sredy Belarusi* [The state of the natural environment of Belarus]. In: *Ecology byulletin*, Minsk: [publisher unknown]; 2014. 364 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 16.09.2021.
Received by editorial board 16.09.2021.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К УЧЕТУ ХОЗЯЙСТВЕННО-БЫТОВЫХ СТОЧНЫХ ВОД, ПОСТУПАЮЩИХ НА ОЧИСТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Ю. В. ГОЛОД¹⁾, С. А. ДУБЕНОК¹⁾

¹⁾Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов,
ул. Славинского, 1, корп. 2, 220086, г. Минск, Беларусь

Хозяйственно-бытовые сточные воды являются одним из основных факторов, оказывающих влияние на формирование сточных вод, поступающих через централизованные системы водоотведения (канализации) на очистные сооружения сточных вод населенных пунктов Республики Беларусь. В централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов поступают хозяйственно-бытовые сточные воды от потребителей (населения) и абонентов (юридических лиц, индивидуальных предпринимателей), а также собственные хозяйственно-бытовые сточные воды предприятий водопроводно-канализационного и жилищно-коммунального хозяйств. При этом централизованные системы водоотведения (канализации) предназначены не только для транспортировки хозяйственно-бытовых, но и для производственных сточных вод, которые также могут оказывать значительное влияние на количественный и качественный состав сточных вод, поступающих на очистные сооружения населенного пункта. Совершенствование методических подходов к учету хозяйственно-бытовых сточных вод включает повышение уровня учета как количественных, так и их качественных характеристик.

В настоящее время отсутствует достоверный учет хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих на очистные сооружения населенных пунктов. Их объем от населения определяется неинструментальным (расчетным) методом – 100 % объема водопотребления. От абонентов, как правило, он также осуществляется неинструментальным методом, что зачастую несопоставимо с объемами воды, использованными абонентами и потребителями на хозяйственно-питьевые нужды. Контроль качества хозяйственно-бытовых сточных вод не осуществляется в связи с отсутствием требований к нормированию хозяйственно-бытовых сточных вод.

При этом необходимо отметить, что балансодержатели централизованных систем водоотведения (канализации) не могут повлиять на количественный и качественный состав хозяйственно-бытовых сточных вод, в связи с чем возникает необходимость разработки методики расчета допустимых концентраций загрязняющих веществ в составе сточных вод, которая, помимо производственных сточных вод, будет учитывать количественные и качественные характеристики хозяйственно-бытовых сточных вод, отводимых в централизованные системы водоотведения (канализации) абонентами и потребителями, а также на очистные сооружения сточных вод населенных пунктов Республики Беларусь.

Ключевые слова: учет сточных вод; хозяйственно-бытовые сточные воды; сооружения очистные; прибор учета; вещества загрязняющие.

Образец цитирования:

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.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-89-102>

For citation:

Holad YuV, Dubianok SA. Improvement of methodological approaches to accounting of household wastewater supplied to treatment facilities in settlements of the Republic of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2021;4:89–102. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-89-102>

Авторы:

Юлия Васильевна Голод – научный сотрудник отдела нормирования воздействия на окружающую среду.
Снежана Анатольевна Дубенок – заместитель директора по научной работе.

Authors:

Yuliya V. Holad, researcher of the department of environmental impact assessment.
yliia-gold@mail.ru
Sniazhana A. Dubianok, deputy director for research.
dsnega@list.ru

IMPROVEMENT OF METHODOLOGICAL APPROACHES TO ACCOUNTING OF HOUSEHOLD WASTEWATER SUPPLIED TO TREATMENT FACILITIES IN SETTLEMENTS OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Yu. V. HOLAD^a, S. A. DUBIANOK^a

^aCentral Research Institute for Complex Use of Water Resources,
1 Slavinskogo Street, 2 building, Minsk 220086, Belarus
Corresponding author: S. A. Dubianok (dsnega@list.ru)

Domestic wastewater is one of the main factors influencing the formation of wastewater flowing through centralized drainage systems (sewerage) to wastewater treatment plants in settlements of the Republic of Belarus.

The centralized sewage systems (sewerage) of settlements receive domestic wastewater from consumers (population) and subscribers (legal entities, individual entrepreneurs), as well as their own domestic wastewater from enterprises of water supply and sewerage services and housing and communal services. At the same time, centralized sewerage systems (sewerage systems) are designed not only for the transportation of household, but also for industrial wastewater, which can also have a significant impact on the quantitative and qualitative composition of wastewater entering the treatment facilities of the settlement. Improvement of methodological approaches to the accounting of domestic wastewater includes an increase in the level of accounting for both quantitative and qualitative characteristics of domestic wastewater.

Currently, there is no reliable accounting of household wastewater entering the treatment facilities of settlements: their volume from the population is determined by the non-routine (calculation) method – 100 % of the volume of water consumption, from subscribers – as a rule, it is also carried out by the non-instrumental method, which is often incomparable with the volumes of water used by subscribers and consumers for household and drinking needs. The quality control of domestic wastewater is not carried out due to the lack of requirements for standardization of domestic wastewater. It should be noted that the balance holders of centralized wastewater disposal (sewerage) systems cannot affect the quantitative and qualitative composition of domestic wastewater, and therefore it becomes necessary to develop a methodology for calculating the permissible concentrations of pollutants in wastewater, which, in addition to industrial wastewater, will take into account the quantitative and qualitative characteristics of household wastewater discharged to centralized wastewater disposal (sewerage) systems by subscribers and consumers, and then to wastewater treatment plants in settlements of the Republic of Belarus.

Keywords: domestic wastewater; treatment facilities; metering device; polluting substances.

Введение

Очистные сооружения сточных вод населенных пунктов Республики Беларусь, находящиеся на балансе предприятий водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) и жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), предназначены для очистки сточных вод, отводимых в централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов абонентами (юридические лица, индивидуальные предприниматели) и потребителями (население)¹.

В централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов поступают хозяйственно-бытовые, производственные и поверхностные сточные воды. Как правило, в большинстве населенных пунктов Республики Беларусь, объем сточных вод, попадающих на очистные сооружения, формируется за счет объема хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих как от потребителей, так и от абонентов.

В соответствии с Водным кодексом Республики Беларусь, хозяйственно-бытовые воды – это сточные воды, которые образуются в жилых помещениях, а также в бытовых помещениях объектов промышленности, административных зданий и других объектов в результате удовлетворения личных (бытовых) нужд работников и сбрасываются в окружающую среду, в том числе через централизованные системы водоотведения (канализации) [1].

Постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 26 мая 2017 г. № 16 «О нормативах допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод» введено понятие «городские сточные воды» – это хозяйственно-бытовые или их смесь с производственными сточными водами и (или) поверхностными сточными водами, сбрасываемые в окружающую среду через централизованную систему водоотведения (канализации) населенных пунктов². Понятие «городские сточные воды» выделено в национальном законодательстве в соответствии с европейскими подходами, изложенными в Директиве Совета Европейского Сообщества от 21 мая 1991 г. «Об очистке город-

¹ СТБ 17.06.02-03-2015. Охрана окружающей среды и природопользование. Гидросфера. Классификация очистных сооружений сточных вод: введ. 25.05.2015. Минск : Гос. комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2015.

² О нормативах допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 26 мая 2017, № 16 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21732141&p1=1> (дата обращения: 24.09.2021).

ских стоков (91/271/ЕЕС)»³. Таким образом, на очистные сооружения сточных вод населенных пунктов практически всегда поступают городские сточные воды.

Отведение сточных вод через централизованные системы водоотведения (канализации) и далее на очистные сооружения сточных вод населенного пункта, осуществляется на основании договора, заключенного между предприятием ВКХ (ЖКХ) и абонентом или потребителем. Взаимоотношения между предприятиями ВКХ (ЖКХ), абонентами и потребителями регламентируются Правилами пользования централизованными системами водоснабжения, водоотведения (канализации) в населенных пунктах, утвержденными постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 30 сентября 2016 г. № 788 (далее – Правила пользования)⁴.

В соответствии с Правилами пользования прием производственных сточных вод, в том числе смеси производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод абонентов, осуществляется на основании условий приема, которые устанавливаются местными исполнительными и распорядительными органами на срок до 10 лет. Условия приема включают перечень загрязняющих веществ и их допустимые концентрации в производственных сточных водах абонентов, осуществляющих их отведение в централизованные системы водоотведения (канализации). Допустимые концентрации загрязняющих веществ в составе производственных сточных вод не должны превышать максимальные допустимые концентрации загрязняющих веществ в составе производственных сточных вод установленные в приложении 1 к Правилам пользования и в п. 71.

Учитывая, что система водоотведения населенных пунктов в стране формировалась в основном в 1960–1980-х гг. и большинство действующих очистных сооружений сточных вод населенных пунктов по техническим и экономическим причинам не обеспечивают требуемую эффективность очистки сточных вод перед их сбросом в окружающую среду, а также поскольку основной объем городских сточных вод, поступающих на очистные сооружения сточных вод, формируется за счет хозяйственно-бытовых сточных вод, возникает необходимость разработки методики расчета допустимых концентраций загрязняющих веществ в составе сточных вод, которая помимо производственных сточных вод, будет учитывать количественные и качественные характеристики хозяйственно-бытовых сточных вод, отводимых в централизованные системы водоотведения (канализации) абонентами и потребителями, и далее на очистные сооружения сточных вод населенных пунктов Республики Беларусь.

Необходимо отметить, что такие методики применяются в Молдове, России и Украине [2].

Проведенные исследования автора, предшествующие разработке методики, показали, что она должна учитывать следующие факторы:

- требования по установленным допустимым концентрациям загрязняющих веществ в составе очищенных сточных вод на выпуске в водный объект, для предприятий ВКХ (ЖКХ) в комплексных природоохранных разрешениях или в разрешениях на специальное водопользование;
- фактическую эффективность работы очистных сооружений сточных вод населенных пунктов;
- условия формирования сточных вод в пределах населенного пункта, поступающих на очистные сооружения, качественные и количественные характеристики сточных вод.

Материалы и методы исследования

Результаты проведенного анализа основных показателей водопользования предприятий ВКХ (ЖКХ) Беларуси за 2017–2020 гг. указывают, что объем хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих в составе городских сточных вод на очистные сооружения сточных вод населенных пунктов, может варьировать в диапазоне от 20 до 95 % от общего объема сточных вод на приемной камере очистных сооружений.

Хозяйственно-бытовые сточные воды формируются и поступают в централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов от:

- потребителей и абонентов, подключенных к централизованным системам водоотведения (канализации);
- потребителей и абонентов, не подключенных к централизованным системам водоотведения (канализации) и осуществляющих их отведение посредством ассенизационного транспорта;
- хозяйственно-бытовые сточные воды непосредственно от самих предприятий ВКХ (ЖКХ), обслуживающих централизованную систему водоотведения (канализации).

Учет хозяйственно-бытовых сточных вод потребителей (населения), подключенных к централизованной системе водоотведения (канализации), осуществляется, как правило, расчетным методом – 100 % от

³91/271/ЕЕС. Об очистке городских стоков: Директива Совета Европейского Сообщества, 21 мая 1991 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902150970> (дата обращения: 24.09.2021).

⁴Об утверждении Правил пользования централизованными системами водоснабжения, водоотведения (канализации) в населенных пунктах: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 30 сен. 2016 г., № 788 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21600788&p1=1> (дата обращения: 24.09.2021).

объема воды, потребленной населением, поскольку приборный учет хозяйственно-бытовых сточных вод отсутствует.

Учет хозяйственно-бытовых сточных вод абонентов, подключенных в централизованной системе водоотведения (канализации) населенного пункта, в соответствии с Правилами пользования⁴ может осуществляться одним из следующих способов:

- по фактическим данным объемов отведения сточных вод, учет которых осуществляет через узел учета, преимущественно приборами учета, установленными на границе присоединения к централизованной системе водоотведения (канализации);

- при отсутствии у абонента приборного учета сточных вод объем потребленной услуги водоотведения (канализации) определяется на основании объема услуги водоснабжения (при этом также учитывается объем воды, используемый для своих нужд из других систем (источников) водоснабжения);

- по фактическим данным водопотребления с учетом разработанных и утвержденных абонентом индивидуальных технологических нормативов водопользования.

При этом, проведенный автором анализ методов учета производственных сточных вод абонентов в 20 населенных пунктах страны, указывает, что большинство абонентов осуществляют учет сточных вод неинструментальным методом.

При отсутствии подключения к централизованной системе водоотведения (канализации) хозяйственно-бытовые сточные воды потребителей и абонентов могут быть учтены только от той их части, которая осуществляет их вывоз посредством ассенизационного транспорта. Учет таких сточных вод осуществляется абонентскими службами организаций ВКХ (ЖКХ) на основании фактического объема поступления сточных вод через организованные сливные пункты на сети водоотведения по договору с организацией ВКХ (ЖКХ), заключаемого организацией (индивидуальным предпринимателем), осуществляющей откачку и вывоз сточных вод ассенизационным транспортом. Учет хозяйственно-бытовых сточных вод, образовавшихся на предприятиях ВКХ (ЖКХ), осуществляется неинструментальным методом – в объеме 100 % от объема воды, потребленной сотрудниками предприятий ВКХ (ЖКХ) на хозяйственно-питьевые нужды в административно-бытовых зданиях.

В соответствии с п. 31 постановления Совета Министров Республики Беларусь от 12 июня 2014 г. № 571 «Об утверждении Положения о порядке расчетов и внесения платы за жилищно-коммунальные услуги и платы за пользование жилыми помещениями государственного жилищного фонда, а также возмещения расходов на электроэнергию»⁵: «В случае заключения плательщиком жилищно-коммунальных услуг с исполнителем договора на водоснабжение, предусматривающего расчеты за услугу водоснабжения по показаниям приборов индивидуального учета расхода воды, и неосуществления плательщиком жилищно-коммунальных услуг платы по показаниям таких приборов объем потребленной услуги определяется и предъявляется к оплате исполнителем по среднему объему водопотребления за два предыдущих месяца, в которых производилась плата по показаниям приборов индивидуального учета, либо по нормам водопотребления 140 л в сутки на одного зарегистрированного по месту жительства или месту пребывания в данном жилом помещении, если плата по показаниям приборов индивидуального учета не производилась, с проведением последующего перерасчета исходя из показаний приборов индивидуального учета». То есть, предприятие ВКХ (ЖКХ) может осуществлять учет сточных вод, отводимых потребителями, в соответствии с нормативным объемом водопотребления (140 л/сут * чел).

Таким образом, учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что определение объемов хозяйственно-бытовых сточных вод, отводимых на очистные сооружения сточных вод населенных пунктов, посредством централизованных систем водоотведения (канализации) и ассенизационного транспорта, может осуществляться как инструментальным методом (по приборам учета, по объемам ассенизационного транспорта), так и неинструментальным методом (расчетным).

Следует отметить, что в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 25.02.2011 № 72 «О некоторых вопросах регулирования цен (тарифов) в Республике Беларусь» [3], тарифы на коммунальные услуги по водоотведению (канализации) регулируются облисполкомами и Минским горисполком и устанавливаются отдельно для юридических лиц (абонентов), и отдельно для населения (потребителей). В настоящее время исполнительные комитеты (областные и Минский городской), исходя из собственных затрат, устанавливают тарифы для своей подчиненной территории и согласовывают их с Министерством экономики. При

⁴Об утверждении Правил пользования централизованными системами водоснабжения, водоотведения (канализации) в населенных пунктах: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 30 сен. 2016 г., № 788 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21600788&p1=1> (дата обращения: 24.09.2021).

⁵Об утверждении Положения о порядке расчетов и внесения платы за жилищно-коммунальные услуги и платы за пользование жилыми помещениями государственного жилищного фонда, а также возмещения расходов на электроэнергию: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 12 июн. 2014 г., № 571 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21400571&p1=1> (дата обращения: 24.09.2021).

этом, Указами Президента Республики Беларусь ежегодно устанавливаются предельно допустимые тарифы на жилищно-коммунальные услуги ЖКХ (ВКХ) для населения и тарифы, обеспечивающие полное возмещение экономически обоснованных затрат на оказание жилищно-коммунальных услуг населению.

В табл. 1 приведены действующие тарифы на услуги водоснабжения и канализации в г. Минске и областях Республики Беларусь на 01.01.2021 г. Остальные абоненты предприятий ВКХ (ЖКХ), не относящиеся к населению, платят за услуги водоснабжения и водоотведения по более высоким тарифам (за исключением бюджетных организаций).

Таблица 1

Действующие тарифы на услуги водоснабжения и канализации в г. Минске и областях Республики Беларусь на 01.01.2021 г.

Table 1

Current tariffs for water supply and sewerage services in Minsk and regions of the Republic of Belarus as of 01.01.2021

Виды тарифов	Тариф, руб. за 1 м ³							
	Предельно допустимый тариф на 2021 г.	г. Минск	Брестская обл.	Витебская обл.	Гомельская обл.	Гродненская обл.	Минская обл.	Могилевская обл.
Фиксированные тарифы на услуги водоснабжения и канализации для населения, субсидируемые государством								
Услуга водоснабжения	1,0445	0,9283	1,0335	1,0445	1,0445	1,0445	1,0445	1,0445
Услуга водоотведения (канализации)	0,8604	0,5933	0,8604	0,8604	0,8604	0,8604	0,8604	0,8604
Фиксированные тарифы на услуги водоснабжения и канализации для населения, обеспечивающие полное возмещение экономически обоснованных затрат на их оказание								
Услуга водоснабжения	1,1623	0,9283	1,0335	1,1623	1,1610	1,1217	1,1000	1,1603
Услуга водоотведения (канализации)	0,9720	0,5933	0,9295	0,9177	0,9720	0,9166	0,8943	0,8982

На уровне страны тарифы для юридических лиц в среднем в 1,5–3 раза выше, чем тарифы для населения, обеспечивающие полное возмещение экономически обоснованных затрат. В результате крупные промышленные предприятия организуют собственные системы водоотведения и очистки сточных вод с последующим сбросом очищенных сточных вод непосредственно в поверхностные водные объекты.

На основании данных, представленных в Государственном водном кадастре за 2019 год⁶, для определения фактического удельного водоотведения в населенных пунктах проведен анализ водопользования предприятий ВКХ (ЖКХ) в части водоотведения.

Фактические удельные расходы хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих от населения (потребителей), подключенных к централизованной системе водоотведения (канализации) населенных пунктов республики в разрезе 21 населенного пункта за 2019 г., ранжированных по количеству жителей, подключенных к централизованной системе водоотведения (канализации), представлены в табл. 2.

Удельное водоотведение в разрезе 21 населенного пункта находится в диапазоне от 110,6 до 169,2 л на человека в сутки (при норме удельного водопотребления на хозяйственно-питьевые нужды – 140 л на человека в сутки) и при этом в разрезе областных центров удельное водоотведение не коррелирует с удельным водопотреблением: в г. Минск удельное водоотведение составило 164,5 л/сут на человека, при удельном водопотреблении 127,8 л/сут на человека, в г. Бресте удельное водоотведение – 142,7 л/сут на человека, при удельном водопотреблении – 137,0 л/сут на человека, в г. Витебске удельное водоотведение – 129,2 л/сут на человека, при удельном водопотреблении – 124,0 л/сут на человека, г. Гомеле удельное водоотведение – 142,6 л/сут на человека, при удельном водопотреблении – 119,6 л/сут на человека, в г. Гродно – удельное водоотведение 130,2 л/сут на человека, при удельном водопотреблении – 132,1 л/сут на человека, в г. Могилеве – удельное водоотведение 169,20 л/сут на человека, при удельном водопотреблении – 151,8 л/сут на человека. Это подтверждает отсутствие достоверного учета предприятиями ВКХ (ЖКХ) хозяйственно-бытовых сточных вод, отводимых как потребителями (населением), так и абонентами в централизованные системы водоотведения (канализации) населенных пунктов.

⁶Официальный сайт РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов». URL: <http://www.cricuw.by> (дата обращения: 24.09.2021).

Таблица 2

Фактический удельный расход хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих от населения (потребителей), подключенных к централизованной системе водоотведения (канализации) населенных пунктов за 2019 г.

Table 2

Actual specific consumption of domestic wastewater coming from the population (consumers) connected to the centralized water disposal (sewerage) system of settlements in 2019

№ п/п	Наименование	Объем хозяйственно-бытовых сточных вод, м ³	Количество жителей, подключенных к централизованной системе водоотведения (канализации), чел.	Удельное водоотведение, л/сут*чел
Количество жителей более 300 тыс. человек				
1	Минск	121 600 506,30	2025231	164,50
2	Гомель	24 006 691,00	461291	142,58
3	Витебск	15 891 335,63	337215	129,20
4	Могилев	21 105 340,00	341741	169,20
5	Гродно	17 190 001,00	361627	130,23
6	Брест	16 818 200,00	322883	142,71
Количество жителей свыше 90 тыс. и до 300 тыс. человек				
7	Бобруйск	8 565 055,00	187696	125,02
8	Барановичи	6 718 120,00	156315	117,75
9	Борисов	5 325 217,00	118268	123,36
10	Пинск	5 032 286,00	122862	112,22
11	Орша	4 317 918,00	103979	113,77
12	Лида	5 281 765,00	95985	150,76
13	Солигорск	5 444 781,00	108908	136,97
14	Молодечно	3 682 311,80	90194	112,78
Количество жителей до 90 тыс. человек				
15	Жодино	2 696 512,00	61267	120,58
16	Слоним	2 076 840,00	40483	140,55
17	Волковыск	1 491 985,00	35406	115,45
18	Новогрудок	950 115,00	23172	112,34
19	Костюковичи	50 6076,00	12535	110,61
20	Копыль	314 927,71	6895	126,17
21	Глуск	202 942,00	4720	117,80

Среднее фактическое удельное водоотведение в г. Минске и областных центрах страны составляет 146,40 л/сут на человека, в населенных пунктах с количеством подключенного населения к централизованной системе водоотведения (канализации) от 90 тыс. человек до 300 тыс. человек – 124,08 л/сут на человека, в населенных пунктах с числом подключенных жителей до 90 тыс. человек – 120,50 л/сут на человека. Таким образом, можно сделать вывод, что чем меньше населенный пункт, тем ниже объем водоотведения в разрезе суточного объема сброса хозяйственно-бытовых сточных вод на одного человека.

Необходимо подчеркнуть, что в настоящее время значительная часть предприятий ВКХ (ЖКХ) не осуществляет дифференцированного учета сточных вод, поступающих в централизованные системы водоотведения (канализации) и, соответственно, не имеет достаточного количества первичных данных для корректного заполнения ежегодной формы государственной статистической отчетности 1-вода (Минприроды) «Отчет об использовании воды». Основные проблемы при заполнении статистической отчетности предприятиями ВКХ (ЖКХ) сводятся к следующему:

- отсутствует разбивка по видам сточных вод – производственные, хозяйственно-бытовые, поверхностные сточные воды;
- при наличии у предприятия ВКХ (ЖКХ) централизованных систем водоотведения (канализации) и очистных сооружений в нескольких населенных пунктах данные по объемам сточных вод представляются

суммарно, что не позволяет определить удельное водопотребление и водоотведение для отдельных населенных пунктов.

Совершенствование методического подхода к учету количественных характеристик хозяйственно-бытовых сточных вод, включает дифференцированный подход учета хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих в централизованные системы водоотведения (канализации) от:

- потребителей;
- абонентов;
- доставляемые ассенизационным транспортом;
- собственные хозяйственно-бытовые сточные воды предприятий ВКХ (ЖКХ).

Дифференцированный учет хозяйственно-бытовых сточных вод с ведением первичной отчетной документации позволит предприятиям ВКХ (ЖКХ) повысить эффективность учета при поступлении на приемную камеру очистных сооружений населенного пункта для их последующего нормирования в общем объеме сточных вод населенного пункта.

Помимо недостоверного учета количества хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих в централизованную систему водоотведения (канализации), существует проблема с учетом качества хозяйственно-бытовых сточных вод.

В соответствии с действующими нормативными правовыми актами и техническими нормативными правовыми актами Республики Беларусь, требования к качеству хозяйственно-бытовых сточных вод регламентированы в СН 4.01.02-2019 Канализация. Наружные сети и сооружения при проектировании очистных сооружений⁷.

Концентрация загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых сточных вод рассчитывается исходя из массы загрязняющего вещества на одного человека в сутки в соответствии с СН 4.01.02-2019, где приведена масса для расчета концентрации по взвешенным веществам, биохимическому потреблению кислорода (БПК₅), химическому потреблению кислорода (ХПК), аммоний-иону, азоту по Кьельдалю, фосфору общему, фосфат-иону и хлорид-иону.

В соответствии с п. 10.1.2 СН 4.01.02-2019⁸, поступление загрязняющих веществ в хозяйственно-бытовых сточных водах от одного жителя для определения их концентрации следует принимать в соответствии с данными, представленными в табл. 3.

Таблица 3

Масса загрязняющих веществ в соответствии с СН 4.01.02-2019

Table 3

Weight of pollutants in accordance with СН 4.01.02-2019

№ п/п	Показатель	Количество загрязняющих веществ, г/(чел.×сут)
1	Взвешенные вещества	65,0
2	БПК ₅ неосветленной сточной воды	60,0
3	Химическое потребление кислорода (ХПК) неосветленной сточной воды	120,0
4	Аммоний-ион в пересчете на азот (азот аммонийный)	10,0
5	Азот по Кьельдалю	12,0
6	Фосфор общий	2,0
7	Фосфат-ион в пересчете на фосфор	1,4
8	Хлорид-ион	9,0

Впервые требования к качеству хозяйственно-бытовых сточных вод были разработаны и утверждены в 1986 г. в СНиП 2.04.03-85 Канализация, наружные сети и сооружения⁹. С тех пор эти требования были незначительно изменены в части дополнения перечня загрязняющих веществ.

В СН 4.01.02-2019 представлены данные по содержанию (концентрациям) загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых сточных вод по 8 показателям, при этом перечень обязательных к нормированию загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых сточных вод на выпуске в водный объект в соответ-

⁷СН 4.01.02-2019. Канализация. Наружные сети и сооружения при проектировании очистных сооружений = Канализация. Значворныя сеткі і збудаванні: введ. 31.10.2019. – Минск : Министерство архитектуры и строительства, 2019.

⁸Там же.

⁹СНиП 2.04.03-85. Канализация, наружные сети и сооружения: введ. 21.05.1985.

ствии с постановлением «О нормативах допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод» составляет 11 показателей. Таким образом, при проектировании очистных сооружений сточных вод населенных пунктов для хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих от потребителей (населения), отсутствуют нормативные данные по сульфат-иону, минерализации, азоту общему, СПАВ (анион.).

Также необходимо отметить, что при поступлении на очистные сооружения населенных пунктов городских сточных вод, перечень загрязняющих веществ на выпуске в водный объект для предприятий ВКХ (ЖКХ) включает специфические загрязняющие вещества: нефтепродукты, тяжелые металлы (железо общее, свинец, цинк, никель, медь и др.), а также фенолы и формальдегид.

Как показывает практика, перечень загрязняющих веществ для предприятий ВКХ (ЖКХ), установленный в разрешении на специальное водопользование или в комплексном природоохранном разрешении, составляет от 9 до 18 показателей, в связи с чем возникает проблема установления допустимых концентраций загрязняющих веществ по ряду показателей, отсутствующих в СН 4.01.02-2019, даже на стадии проектирования очистных сооружений.

Концентрацию загрязняющих веществ в составе сточных вод следует определять, исходя из удельного среднесуточного водоотведения на одного жителя. Учитывая, фактический удельный расход хозяйственно-бытовых сточных вод и допустимую массу загрязняющих веществ, установленную в СН 4.01.02-2019, концентрация загрязняющих веществ находится в следующих диапазонах:

- взвешенные вещества – от 475,57 мг/дм³ до 991,53 мг/дм³;
- БПК₅ – от 438,99 мгО₂/дм³ до 915,25 мгО₂/дм³;
- ХПК – от 877,98 мгО₂/дм³ до 1830,51 мгО₂/дм³;
- аммоний-ион – от 73,17 мгN/дм³ до 152,54 мгN/дм³;
- азот по Кьельдалю (не нормируется на выпуске в водный объект) – от 87,8 мг/дм³ до 183,05 мг/дм³;
- фосфор общий – от 14,63 мг/дм³ до 30,51 мг/дм³;
- фосфат-ион (не нормируется на выпуске в водный объект) – от 10,24 мгP/дм³ до 21,36 мгP/дм³;
- хлорид-ион – от 65,85 мг/дм³ до 137,29 мг/дм³.

Учитывая проведенные исследования по объемам удельного водоотведения в разрезе 21 населенного пункта республики и широкий диапазон объемов удельного водоотведения, для оценки применимости массы и концентраций загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых сточных вод, представленных в СН 4.01.02-2019, проведено исследование состава и свойств хозяйственно-бытовых сточных вод на основании точечных отборов проб, проведенных предприятиями ВКХ (ЖКХ) в рамках исследований, выполняемых РУП «ЦНИИКИВР».

Отбор проб осуществлялся в 21 населенном пункте, в 13 из которых проводились исследования по удельному водоотведению, изложенные выше. В 8 населенных пунктах, где осуществлялись исследования качества хозяйственно-бытовых сточных вод, расчет удельного водоотведения не проводился, поскольку отсутствовали данные по объемам образования хозяйственно-бытовых сточных вод.

В табл. 4 представлены сводные данные по фактическому содержанию загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых сточных вод в 21 населенном пункте с учетом их ранжирования по количеству проживающего населения:

- до 90 тыс. чел. (11 населенных пунктов) – малый населенный пункт;
- от 90 тыс. до 300 тыс. чел. (7 населенных пунктов) – средний населенный пункт;
- свыше 300 тыс. (3 населенных пункта) – большой населенный пункт.

Анализ полученных данных табл. 4 указывает, что содержание загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых сточных вод в малых, средних и больших населенных пунктах варьирует в довольно широких диапазонах. При этом по основным загрязняющим веществам, характерным для хозяйственно-бытовых сточных вод, верхний предел фактических концентраций в больших населенных пунктах с численностью населения свыше 300 тыс. человек ниже, чем в малых и средних населенных пунктах, что связано, прежде всего, с удельным водоотведением хозяйственно-бытовых сточных вод. Таким образом, можно сделать вывод, что чем ниже удельный объем водоотведения, тем более концентрированные хозяйственно-бытовые сточные воды поступают в централизованную систему водоотведения населенного пункта.

Для уточнения состава хозяйственно-бытовых сточных вод в суточном разрезе авторами в период 2019–2021 гг. в трех населенных пунктах проводились экспериментальные исследования хозяйственно-бытовых сточных вод.

В соответствии с СТБ ГОСТ Р 51592-2001 Вода. Общие требования к отбору проб [12] отбор точечных проб применяют, когда поток воды неоднороден; значения определяемых показателей не постоянны; использование составной пробы делает неясными различия между отдельными пробами; при исследовании возможного наличия загрязнения или для определения времени (в случае автоматического отбора проб) его появления, а также при проведении обширной программы отбора проб.

Таблица 4

Содержание загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых сточных вод по результатам точечных отборов проб

Table 4

The content of pollutants in the composition of domestic wastewater, according to the results of spot sampling

№ п/п	Наименование	Фактические концентрации загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых сточных вод (по результатам точечных отборов проб)		
		Количество жителей до 90 тыс. чел.	Количество жителей от 90 тыс. до 300 тыс. чел.	Количество жителей свыше 300 тыс. чел.
1	Водородный показатель (рН), ед. рН	7,0–8,6	6,3–9,1	7–8,5
2	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	130–795	174,4–702	110–640
3	ХПК, мгО ₂ /дм ³	143–1770	258,4–1835	220–1420
4	Взвешенные вещества, мг/дм ³	33,6–694	48–616	145–758
5	Минерализация, мг/дм ³	299–1211	496,5–1128	206–1124
6	Хлорид-ион, мг/дм ³	17–167,6	32,9–237,8	20,9–165,2
7	Сульфат-ион, мг/дм ³	3,91–198,6	18,1–182,7	10,73–63,15
8	Аммоний-ион, мгN/дм ³	12,9–89	25,5–90,4	12,8–66,1
9	Азот общий, мг/дм ³	16,4–90,7	37,6–123,25	18,81–83,8
10	Фосфор общий, мг/дм ³	2,8–15	1,9–13,7	1,1–15,6
11	СПАВ (анион.), мг/дм ³	0,082–6,7	0,13–7,62	0,01–4,88
12	Нефтепродукты, мг/дм ³	0,096–3,2	0,29–2,55	0,028–2,67
13	Железо общее, мг/дм ³	0,354–2,67	0,245–4,17	1,07–6,98
14	Медь, мг/дм ³	0,0006–0,0032	0,0005–0,146	0,0082–0,679
15	Никель, мг/дм ³	0,01–0,077	0,0005–0,338	0,002–0,088
16	Цинк, мг/дм ³	0,032–0,06	0,005–0,26	0,036–0,93
17	Свинец, мг/дм ³	0,0018–0,0026	0,0002–0,0046	0,005–0,049
18	Хром общий, мг/дм ³	0,005–0,018	0,0043–0,04	0,005–0,012
19	Фенолы суммарно, мг/дм ³	–	0,0005	0,0005–0,212
20	Формальдегид, мг/дм ³	–	0,02	0,02–0,185
21	Кадмий, мг/дм ³	–	0,00022	0,0005–0,00065
22	Сероводород и сульфид-ион, мг/дм ³	–	0,15–0,93	0,01
23	Кобальт, мг/дм ³	–	–	0,0079–0,043

Перечень населенных пунктов, в которых осуществлялись лабораторные испытания качества хозяйственно-бытовых сточных вод, определялся с учетом уже имеющихся данных о качественных и количественных характеристиках сточных вод, а также с градацией по количеству населения, проживающего в населенном пункте:

– малый населенный пункт (до 90 тыс. чел.) – г. Копыль (1 отбор хозяйственно-бытовых сточных вод в 1 точке);

– средний населенный пункт (свыше 90 тыс. до 300 тыс. чел.) – г. Молодечно (1 отбор хозяйственно-бытовых сточных вод в 1 точке);

– большой населенный пункт (свыше 300 тыс. чел.) – г. Брест (по 1 отбору хозяйственно-бытовых сточных вод в 3 точках).

Все отборы проб осуществлялись непосредственно из потока хозяйственно-бытовых сточных вод в канализационных колодцах перистальтическим насосом марки Etatron B3-V PER (рис. 1).

В течение суток насос дозированно перекачивал хозяйственно-бытовые сточные воды в емкость в канализационных колодцах непосредственно из потока, в результате получена среднесуточная проба хозяйственно-бытовых сточных вод. Усредненная проба фасовалась в емкости для транспортировки, предварительно каждая емкость была ополоснута сточной водой и далее заполнена доверху (под крышечку)¹⁰. Отбор проб осуществился специалистами ВКХ (ЖКХ), имеющими аккредитацию на отбор проб.



Рис. 1. Насосное оборудование для отбора проб

Fig. 1. Pumping equipment for sampling

Для транспортировки сточных вод в аккредитованную лабораторию использовались емкости из полимерного материала и стекла (рис. 2):

- из полимерного материала (водородный показатель (рН), минерализация (сухой остаток), ХПК, взвешенные вещества, аммоний-ион, азот общий, железо общее, кадмий, кобальт, медь, никель, свинец, сульфат-ион, хлорид-ион, хром общий, цинк);

- из стекла (фенолы, БПК₅, ХПК, нефтепродукты, СПАВ(анион.), формальдегид, фосфор общий).

Лабораторные испытания сточных вод проводились испытательными лабораториями, аккредитованными в национальной системе аккредитации Республики Беларусь.



Рис. 2. Хозяйственно-бытовые сточные воды, подготовленные для их транспортировки

Fig. 2. Domestic waste water prepared for transportation

¹⁰СТБ ГОСТ Р 51592-2001. Вода. Общие требования к отбору проб: введ. 01.11.2002. – Минск: Гос. комитет по стандартизации Респ. Беларусь, 2002.

Результаты лабораторных испытаний хозяйственно-бытовых сточных вод представлены в табл. 5.

Таблица 5

Фактическая концентрация загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых сточных вод в суточном разрезе

Table 5

The actual concentration of pollutants in the composition of domestic wastewater in the daily section

№ п/п	Наименование	Среднесуточная концентрация г. Копыль	Среднесуточная концентрация г. Молодечно	Среднесуточная концентрация г. Брест		
				Точка 1	Точка 2	Точка 3
1	Водородный показатель, ед. pH	7,4	7,3	7,8	8,0	7,2
2	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	179	173	228	180	324
3	ХПК, мгО ₂ /дм ³	676	692	432	650	544
4	Взвешенные вещества, мг/дм ³	125	118	121	61,6	192
5	Аммоний-ион, мгN/дм ³	37	31,6	37,5	39,5	34,6
6	Азот общий, мг/дм ³	55,5	47,48	45,56	47,77	41,24
7	Фосфор общий, мг/дм ³	9,78	7,75	7,3	7,6	10,5
8	Минерализация воды, мг/дм ³	1088	933	533	502	693
9	Хлорид-ион, мг/дм ³	94,5	181	65,2	68	92
10	Сульфат-ион, мг/дм ³	38,4	45,1	22,2	22,5	8,7
11	СПАВ (анион.), мг/дм ³	0,274	0,385	1,92	1,66	1,53
12	Нефтепродукты, мг/дм ³	1,6	2,33	0,024	0,021	0,026
13	Железо общее, мг/дм ³	0,19	0,253	0,238	0,264	0,52
14	Медь, мг/дм ³	0,017	0,0083	0,0195	0,0174	0,0243
15	Никель, мг/дм ³	0,00619	0,00618	0,003	0,002	0,005
16	Цинк, мг/дм ³	0,071	0,094	0,077	0,071	0,058
17	Свинец, мг/дм ³	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
18	Хром общий, мг/дм ³	0,002	0,002	0,02	0,002	0,002
19	Кадмий, мг/дм ³	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
20	Кобальт, мг/дм ³	0,005	0,005	–	–	–
21	Фенолы (суммарно), мг/дм ³	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
22	Формальдегид, мг/дм ³	0,02	0,02	0,002	0,02	0,02

В соответствии с данными, представленными в табл. 5, концентрация загрязняющих веществ в составе суточных проб хозяйственно-бытовых сточных вод в разных населенных находится в следующих диапазонах:

1. По показателям, характерным для хозяйственно-бытовых сточных вод:

- водородный показатель – от 7,2 до 8 ед. pH (в среднем – 7,54 ед. pH);
- БПК₅ – от 173 до 324 мгО₂/дм³ (в среднем – 216,8 мгО₂/дм³);
- ХПК – от 432 до 692 мгО₂/дм³ (в среднем – 598,8 мгО₂/дм³);
- взвешенные вещества – от 61,6 до 192 мг/дм³ (в среднем – 123,52 мг/дм³);
- аммоний-ион – от 31,6 до 39,5 мгN/дм³ (в среднем – 36,04 мгN/дм³);
- азот общий – от 41,24 до 55,5 мг/дм³ (в среднем – 47,51 мг/дм³);
- фосфор общий – от 7,3 до 10,5 мг/дм³ (в среднем – 8,59 мг/дм³);
- минерализация – от 502 до 1088 мг/дм³ (в среднем – 749,8 мг/дм³);
- хлорид-ион – от 65,2 до 181 мг/дм³ (в среднем – 100,14 мг/дм³);
- сульфат-иона – от 8,7 до 45,1 мг/дм³ (в среднем – 27,38 мг/дм³);
- СПАВ(анион) – 0,274 до 1,92 мг/дм³ (в среднем – 1,15 мг/дм³).

Фактическое содержание загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых сточных вод по характерным для них загрязняющим веществам в разных населенных пунктах находится в довольно близком

диапазоне, подтверждающем вывод о том, что качественный состав хозяйственно-бытовых сточных вод не зависит от количества населения, проживающего в населенном пункте.

2. По специфическим загрязняющим веществам:

- нефтепродукты – от 0,021 до 2,33 мг/дм³ (в среднем – 0,80 мг/дм³);
- железо общее – от 0,19 до 0,52 мг/дм³ (в среднем – 0,293 мг/дм³);
- медь – от 0,0083 до 0,0243 мг/дм³ (в среднем – 0,017 мг/дм³);
- никель – от 0,002 до 0,00619 мг/дм³ (в среднем – 0,0044 мг/дм³);
- цинк – от 0,058 до 0,094 мг/дм³ (в среднем – 0,074 мг/дм³).

Содержание остальных специфических загрязняющих веществ (свинец, хром общий, кадмий, кобальт, фенолы суммарно, формальдегид) не превышало уровень предела обнаружения данных загрязняющих веществ.

Наличие содержания нефтепродуктов характерно для хозяйственно-бытовых сточных вод, и связано с использованием в повседневной жизни человека различных масел для пищевых и косметических целей.

Содержание таких тяжелых металлов в составе хозяйственно-бытовых сточных вод, как железо общее, медь, никель, цинк, связано с двумя факторами: материалом используемых трубопроводных сетей и качеством исходной воды, подаваемой в централизованную систему водоснабжения населенных пунктов на хозяйственно-питьевые нужды населения.

Наличие таких специфических загрязняющих веществ, как свинец, хром общий, кадмий, кобальт, фенолы, формальдегид не характерно для хозяйственно-бытовых сточных вод, что подтверждается их содержанием ниже уровня предела обнаружения методики по данным лабораторных испытаний.

Анализ законодательства Украины¹¹, Молдовы¹² и России¹³ в части определения качественных характеристик хозяйственно-бытовых сточных вод свидетельствует, что в нормативных правовых актах рассматриваемых стран установлены значения концентраций и массы по отдельным загрязняющим веществам и показателям в составе хозяйственно-бытовых сточных вод. Сравнительный анализ перечня загрязняющих веществ и показателей, включая их нормативное содержание в хозяйственно-бытовых сточных водах, представлен в табл. 6.

Сопоставительный анализ данных в табл. 6 позволяет сделать следующие выводы:

– наиболее широкий перечень веществ и показателей в составе хозяйственно-бытовых сточных вод содержится в НПА Молдовы – 9 веществ и показателей;

– в НПА Украины содержание загрязняющих веществ выражается концентрацией в составе хозяйственно-бытовых сточных вод – г/м³, и не зависит от количества населения, подключенного к централизованной системе водоотведения (канализации), и их удельного водоотведения; при этом в НПА Молдовы, России и Беларуси содержание загрязняющих веществ выражается массой – г/сут на 1 жителя и зависит от их удельного водоотведения;

– значения массы загрязняющих веществ по взвешенным веществам и показателю БПК₅ в НПА Молдовы, России и Беларуси одинаковы, а в НПА Украины – отсутствуют, по показателю ХПК – одинаковы и приведены только в НПА Молдовы и Беларуси;

– сравнение значений массы загрязняющих веществ по хлорид-иону в НПА Молдовы и Беларуси одинаковы, в НПА Украины масса хлорид-иона рассчитывается с учетом фактического содержания хлорид-иона в источнике водоснабжения, в НПА России данные отсутствуют;

– СПАВ нормируется только в двух странах – Украине и Молдове, а в Беларуси и России – нормативные значения по содержанию СПАВ отсутствуют, однако ранее в СНиП 2.04.03-85¹⁴, действовавшем до 2010 г., была установлена масса СПАВ на уровне 2,5 г/сут на одного жителя;

– содержание фосфатов в НПА Беларуси составляет 1,4 г/сут на одного жителя (в ранее действовавшем СНиП 2.04.03-85¹⁵ масса фосфатов была установлена на уровне 3,3 г/сут на одного жителя), в НПА России – 1,5 г/сутки на одного жителя, Молдовы – 3,3 г/сут на одного жителя. В соответствии с постановлением Минприроды № 16 данный показатель не нормируется на выпуске в водный объект, осуществляется нормирование только фосфора общего, масса которого представлена в составе хозяйственно-бытовых сточных вод на одного жителя только в России и Беларуси;

¹¹ Об утверждении Правил приема сточных вод в системы водоотведения и Порядка определения размера платы, взимаемой за сверхнормативные сбросы сточных вод в системы водоотведения: приказ Министерства регионального развития, строительства жилищно-коммунального управления Украины, 1 дек. 2017 г., № 316 // Информационная система Континент. URL: http://continent-online.com/Document/?doc_id=36705649#-pos=0;0 (дата обращения: 24.09.2021).

¹² Об утверждении Положения о требованиях к сбору, очистке и сбросу сточных вод в канализационную систему и/или в приемник для городских и сельских населенных пунктов: постановление Правительства Респ. Молдова, 25 нояб. 2013 г., № 950 // База данных Законодательство стран СНГ. URL: https://base.spinform.ru/show_doc.fwx?rgn=64899. (дата обращения: 24.09.2021).

¹³ СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения: введ. 26.06.2019. Москва: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2019.

¹⁴ СНиП 2.04.03-85. Канализация, наружные сети и сооружения: введ. 21.05.1985.

¹⁵ Там же.

– данные по содержанию аммоний-иона представлены в НПА всех исследуемых странах, установленная масса в НПА Молдовы, России и Беларуси достаточно близка;
– в НПА Украины представлены требования к содержанию железа общего и жиров в составе хозяйственно-бытовых сточных вод, что является хорошей практикой, так как данные показатели в соответствии с результатами исследований состава хозяйственно-бытовых сточных вод, приведенными выше, присутствуют в значительных концентрациях в составе хозяйственно-бытовых сточных вод.

Таблица 6

**Перечень загрязняющих веществ и их значения, установленные
в нормативных правовых актах Украины, Молдовы, России и Беларуси**

Table 6

The list of pollutants and their masses established in the regulatory legal acts of Ukraine, Moldova, Russia and Belarus

№ п/п	Наименование показателя	Масса загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых сточных вод, установленная в НПА Украины	Масса загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых сточных вод, установленная в НПА Молдовы	Масса загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых сточных вод, установленная в НПА России	Масса загрязняющих веществ в составе хозяйственно-бытовых сточных вод, установленная в НПА Беларуси
1	Азот аммонийный	20 г/м ³	8,0 г/сутки на 1 жителя	10,5 г/сутки на 1 жителя	10 г/сутки на 1 жителя
2	Железо общее	2 г/м ³	–	–	–
3	Жиры	30 г/м ³	–	–	–
4	СПАВ	5 г/м ³	2,5 г/сутки на 1 жителя	–	–
5	Хлорид-ион	Дополнительно 50 г/м ³ к содержанию в источнике водоснабжения	9,0 г/сутки на 1 жителя	–	9,0 г/сутки на 1 жителя
6	Фосфаты	10 г/м ³	3,3 г/сутки на 1 жителя	1,5 г/сутки на 1 жителя	1,4 г/сутки на 1 жителя
7	Фосфор общий	–	–	2,5 г/сутки на 1 жителя	2 г/сутки на 1 жителя
8	Взвешенные вещества	–	65 г/сутки на 1 жителя	65 г/сутки на 1 жителя	65 г/сутки на 1 жителя
9	БПК ₅	–	60 г/сутки на 1 жителя	60 г/сутки на 1 жителя	60 г/сутки на 1 жителя
10	Концентрация ионов водорода	–	6,5–8,5	–	–
11	Температура	–	Ниже 30 градусов	–	–
12	ХПК	–	120 г/сутки на 1 жителя	–	120 г/сутки на 1 жителя
13	Азот по Кьельдалю	–	–	–	12 г/сутки на 1 жителя
14	Азот общий	–	–	13 г/сутки на 1 жителя	–

Учитывая вышеизложенное, а также требования к нормированию хозяйственно-бытовых сточных вод при их отведении после очистки в водные объекты¹⁶, перечень нормируемых веществ должен включать 11 показателей, в связи с чем в перечень загрязняющих веществ при проектировании очистных сооружений сточных вод населенных пунктов, а также при нормировании производственных сточных вод отводимых в централизованные системы водоотведения (канализации) необходимо дополнительно включить азот общий, минерализацию, сульфат-ион, СПАВ (анион.), а также железо общее и нефтепродукты.

¹⁶О нормативах допустимых сбросов химических и иных веществ в составе сточных вод: постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 26 мая 2017, № 16 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21732141&p1=1> (дата обращения: 24.09.2021).

Заключение

В рамках проведенного исследования условий формирования хозяйственно-бытовых сточных вод разработаны предложения по повышению эффективности учета объемов хозяйственно-бытовых сточных вод, включая дифференциацию учета следующих потоков хозяйственно-бытовых сточных вод:

- учет хозяйственно-бытовых сточных вод потребителей (населения);
- учет хозяйственно-бытовых сточных вод абонентов (юридические лица, индивидуальные предприниматели);
- учет хозяйственно-бытовых сточных вод, доставляемых на очистные сооружения ассенизационным транспортом;
- учет собственных хозяйственно-бытовых сточных вод предприятий ВКХ (ЖКХ).

Дифференцированный учет хозяйственно-бытовых сточных вод с ведением первичной отчетной документации позволит предприятиям ВКХ (ЖКХ) повысить его эффективность при поступлении на приемную камеру очистных сооружений населенного пункта для их последующего нормирования в общем объеме сточных вод населенного пункта.

В части повышения эффективности учета качественных характеристик хозяйственно-бытовых сточных вод требуется расширение перечня загрязняющих веществ в их составе, с включением в него следующих загрязняющих веществ и показателей: азот общий, минерализация, сульфат-ион, СПАВ (анион.), железо общее и нефтепродукты. Совершенствование методического подхода к учету качественных характеристик хозяйственно-бытовых сточных вод позволит задавать более точные параметры при проектировании очистных сооружений, а также снизить нагрузку на очистные сооружения сточных вод населенных пунктов за счет более полноценного учета их качества при проведении расчета допустимых концентраций загрязняющих веществ в составе производственных сточных вод абонентов, отводимых в централизованные системы водоотведения (канализации).

Результаты изложенных научных исследований послужили основой для разработки методики по нормированию производственных сточных вод, отводимых абонентами предприятий ВКХ(ЖКХ) в централизованную систему водоснабжения (канализации) населенных пунктов Республики Беларусь.

Библиографические ссылки

1. Водный кодекс Республики Беларусь: 30 июля 2014 г., № 149-З : принят Палатой представителей 2 апреля 2014 г. : одобр. Советом Респ. 11 апреля 2014 г. : в ред. Закона Респ. Беларусь от 18.06.2019 г. В: *ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь*. – Минск: Национальный центр правовой информации Республики Беларусь; 2020.
2. Голод ЮВ, Дубенок СА. Нормирование производственных сточных вод, отводимых в централизованную систему водоотведения населенных пунктов Республики Беларусь. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2021;2:81–85.
3. О некоторых вопросах регулирования цен (тарифов) в Республике Беларусь : Указ Президента Респ. Беларусь, 25 фев. 2011 г., № 72. *Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь*. 2011;26:1/12374.

References

1. *Vodnyj kodeks Respubliki Belarus* [Water Code of the Republic of Belarus]: 2014 July 30, No. 149-Z : adopted by the House of Representatives on 2014 April 2: approved by the Council of the Rep. on 2014 April 11: Wording, the Law of Rep. Belarus from 2019 June 18. In: *ETALON. Legislation of the Republic of Belarus*. Minsk: National Center for Legal Information. Rep. Belarus; 2020. Russian.
2. Golo YuV, Dubenok SA. Rationing of industrial wastewater discharged to the centralized wastewater disposal system of settlements of the Republic of Belarus. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2021;2:81–85. Russian.
3. On some issues of price regulations (tariffs) in the Republic of Belarus: Decree of the President of the Republic of Belarus. Belarus, 2011 February 25, No. 72. *Natsionalnyy reyestr pravovykh aktov Respubliki Belarus* [National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus]. 2011;26:1/12374.

*Статья поступила в редакцию 29.09.2021.
Received by editorial board 29.09.2021.*

БИОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ УПАКОВКИ В УСЛОВИЯХ, ПРИБЛИЖЕННЫХ К ЕСТЕСТВЕННЫМ

М. В. РЫМОВСКАЯ¹⁾, М. В. РАТКЕВИЧ²⁾, И. А. ГРЕБЕНЧИКОВА¹⁾, Д. С. СЕРГИЕВИЧ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный технологический университет,
ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Беларусь

²⁾СООО «ПластТрейдМ»,
деревня Метличицы, 223119, Логойский район, Минская область, Беларусь

Современные системы раздельного сбора и рециклинга отходов не способны эффективно переработать все упаковочные материалы в составе твердых коммунальных отходов, в частности, тонкостенные изделия, которые не поддаются биоразложению полимерных материалов. Законодательное закрепление необходимости снижения части такой упаковки и даже отказа от нее приводят к разработке новых материалов для этих целей, адекватных критериев и способов установления биоразлагаемости. Оценена биоразлагаемость образца упаковочного материала, состоящего из крахмала, полилактида и полиэфира терефталевой кислоты, в условиях, приближенных к естественным, – в почве и водной среде. Упаковочный материал быстрее разрушается в водной среде, биоразрушение идет активнее в присутствии пептидов, а механическое разрушение быстрее достигается при чередовании увлажнения с подсушиванием. Ведущую роль при биоразрушении играют бактериальные культуры, однако культуры микроскопических грибов практически не обнаруживались. Этот факт может быть связан с эффектом фотоинактивации активных форм кислорода на поверхности оксида титана.

Ключевые слова: биоразлагаемая упаковка; полимерный материал; биоразрушение; микробиота; водная среда; почва.

POLYMER PACKAGE BIOLOGICAL DESTRUCTION AT CONDITIONS APPROXIMATED TO NATURAL

M. V. RYMOVSKAYA^a, M. V. RATKEVICH^b, I. A. GREBENCHIKOVA^a, D. S. SERGIEVICH^a

^aBelarusian State Technological University,
13a Sverdlova Street, 220006 Minsk, Belarus

^bLLC «PlastTraidM»,
Metličytsy Village, 223141 Lahoisk District, Minsk Region, Belarus
Corresponding author: M. V. Rymovskaya (rymovskaya_mv@mail.ru)

Образец цитирования:

Рымовская МВ, Раткевич МВ, Гребенчикова ИА, Сергиевич ДС. Биологическое разрушение полимерной упаковки в условиях, приближенных к естественным. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021;4:103–113.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-103-113>

For citation:

Rymovskaya MV, Ratkevich MV, Grebenchikova IA, Sergievich DS. Polymer package biological destruction at conditions approximated to natural. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2021;4:103–113. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-103-113>

Авторы:

Мария Васильевна Рымовская – кандидат технических наук, доцент кафедры биотехнологии.
Максим Вадимович Раткевич – инженер-технолог.
Ирина Александровна Гребенчикова – кандидат технических наук, доцент кафедры биотехнологии.
Денис Степанович Сергиевич – старший преподаватель кафедры биотехнологии.

Authors:

Mariya V. Rymovskaya, PhD (engineering), associate professor at the department of biotechnology.
rymovskaya_mv@mail.ru
Maksim V. Ratkevich, process engineer.
panic44@mail.ru
Irina A. Grebenchikova, PhD (engineering), associate professor at the department of biotechnology.
gre@tut.by
Denis S. Sergievich, senior lecturer at the department of biotechnology.
s.den@tut.by

Modern systems for the separate waste collection and recycling are not able to efficiently process all packaging materials in the composition of municipal solid waste, in particular, thin-walled products made from non-biodegradable polymeric materials. Reducing the share of such packaging and even refusing it has been enshrined in laws, it leads to development of new materials for these purposes, adequate criteria and methods for establishing biodegradability. The biodegradability of packaging material, consisting of starch, polylactide, and polyester of terephthalic acid, has been evaluated under conditions close to natural – in soil and in an aqueous environment. Packaging material degrades faster in an aqueous medium, biodegradation is more active in the presence of peptides, and mechanical destruction is faster achieved by alternating moistening with drying. Bacterial cultures had played the leading role in biodegradation, while cultures of microscopic fungi were practically not detected. This fact can be associated with the effect of photoinactivation of reactive oxygen species on the titanium oxide surface.

Keywords: biodegradable package, polymer material, biodegradation, microbiota, aquatic environment, soil.

Введение

С каждым годом в мире увеличивается потребление продуктов и изделий, реализуемых в упаковке, которая неизбежно становится отходом. В составе твердых коммунальных отходов снижается доля бумаги и картона, увеличивается содержание предметов на основе синтетических полимеров. Из перечня материалов, наиболее часто используемых для производства упаковки (древесина и продукты ее переработки, стекло, металлы и их сплавы, синтетические полимеры на основе нефтепродуктов), организация повторного использования затруднительна для мелких и тонкостенных [1] изделий (они состоят из разнородных фракций, часто загрязнены [2]), а также материалов комбинированного состава, но для остальных же может быть организована с довольно высокой эффективностью [3]. Об этом свидетельствует опыт, например, стран Европы в области обращения с твердыми коммунальными отходами: сортировка отходов на фракции в соответствии со свойствами и организация оборота обменной тары даже малого объема. В любой системе сбора отходов есть фракция смешанных отходов (одноразовые пакеты и использованные средства гигиены, мелкие, фрагментированные, многослойные материалы и изделия из них и т. д.), для которых отсутствуют практики и технологии эффективного раздельного сбора (достижение коэффициента утилизации в 55 % пока считают «амбициозной целью» [4, 5]), сложно проработать способы и пути использования [6], поэтому они находят ограниченное применение – например, в составе бетонов [7]. Судьба этой фракции в подавляющем большинстве случаев – захоронение на специально оборудованных полигонах твердых коммунальных отходов (ТКО) [8].

Решение видят в изготовлении упаковки из биологически разрушаемых материалов. Отработанная система раздельного сбора отходов и маркировка производителем упаковочного материала как биоразлагаемого в странах Европы определяют его переработку в составе органической биоразлагаемой части твердых коммунальных и промышленных отходов путем компостирования или анаэробного сбраживания на промышленных установках либо в условиях частных и фермерских домохозяйств. В основе установления способности упаковки и упаковочных материалов к биологическому разложению по ГОСТ EN 13432–2015¹ лежат процессы компостирования полимерного материала в смеси с растительными остатками и анаэробная переработка.

Отказ от пластиковых пакетов стал глобальной тенденцией и с января 2020 г. на законодательном уровне поддержан в Республике Беларусь [9], задавая направление на организацию производства биоразлагаемой упаковки из растительного сырья. С лета 2019 г. начато производство и продажа в розничной сети упаковочных пакетов с маркировкой соответствия EN 13432². Изучение состава полимерной матрицы этих пакетов показало, что она включает полисахариды растительного происхождения (около 50 % массы, предположительно – только крахмал), полимолочную кислоту (около 30 % массы) и полиэфир терефталевой кислоты (около 25 % массы) [10], а содержание зольного остатка составило около 1,5 % массы. Крахмал и полимолочная кислота доказанно биоразрушаемы, а некоторые полиэфиры терефталевой кислоты, модифицированные дикарбоновыми кислотами, признаны биоразрушаемыми [11] – они гидролизуются ферментными системами микроорганизмов до мономеров, включающихся в биохимические циклы с деструкцией до неорганических соединений. Терефталевая кислота из-за низкой растворимости в воде очень медленно разрушается микроорганизмами, но негативного влияния на биоценозы не оказывает [12].

При изучении биоразложения полимолочной кислоты наблюдалось развитие на поверхности пластика мицелиальных грибов рода *Aspergillus*, *Parengyodontium* и *Penicillium* [13–15], более эффективно биоразрушение происходило в присутствии полипептидов (например, при использовании их в качестве наполнителя) и с повышением аморфности структуры полимолочной кислоты. За 30 суток культурой *Parengyodontium album* ВКМ F-3028 деградировано около 30 % полимера, удельная скорость биodeградации составила 0,015–0,017 мг/(мг·сут).

¹ГОСТ EN 13432–2015. Упаковка. Требования к использованию упаковки посредством компостирования и биологического разложения. Проверочная схема и критерии оценки для распределения упаковок по категориям. Минск: Госстандарт, 2017.

²В магазинах появятся полностью разлагаемые пакеты. Они из кукурузы. Белорусские новости, 13.06.2019. URL: <https://naviny.online/article/20190613/1560433311-v-magazinah-poyavyatsya-polnostyu-razlagaemye-pakety-oni-sdelany-iz> (дата обращения: 20.11.2020).

Большое внимание уделяется роли бактерий рода *Bacillus* в процессе биоразложения полилактидов [16; 17].

Гидролиз ПЭТФ и его аналогов до мономеров обусловлен в основном эстеразами бактерий [18]. Изучение биодegradации полибутиленадипаттерeftалата с использованием радиоактивного изотопа углерода в почве показало, что он поглощается клетками бактерий и мицелиальных грибов и включается в состав клеточных органелл, наблюдается концентрирование изотопов в клетках грибов в виде изолированных областей [19].

При изучении биоразложения полиэтилена, полистирола, полилактида и полибутиленсукцинатов почвы доказано участие в этом процессе бактерий рода *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Rhodococcus*, *Bacillus*, мицелиальных грибов рода *Fusarium* [20; 21]. Показано, что скорости биоразложения полибутиленадипаттерeftалата и полилактида в смеси были ниже, чем для соответствующих отдельных полимеров [22].

В нашей стране переработка органической фракции отходов практически не организована, крупномасштабных установок, ориентированных на получение полезных в народном хозяйстве продуктов (компоста и биогаза), мало. Судьба отработавшей срок службы упаковки в большинстве случаев – полигон твердых коммунальных отходов, где процессы разрушения идут значительно медленнее.

Для того чтобы установить критерии, согласно которым упаковка может быть признана биоразлагаемой, в Республике Беларусь ведется разработка и актуализация стандартов в области установления требований к экологически безопасной (в том числе биоразлагаемой) упаковке и методам ее испытаний³. В их основе лежат как моделирование промышленных процессов (компостирования, анаэробной переработки), так и биоразрушение в условиях окружающей среды (в водной среде и почве).

Факторами, определяющими скорость биоразрушения полимерного материала, являются вид полимера, количественный и качественный состав микробиоты, влажность, температура, наличие легкоутилизируемых субстратов в доступной для усвоения форме, степень доступности молекулярного кислорода, реакция среды по показателю pH, световое воздействие.

Большая эффективность биодеструкции наблюдается у природных и синтетических полимеров, которые содержат легкогидролизуемые химические связи (например, гликозидные пептидные, эфирные). На биодegradацию синтетических полимеров существенно влияет их надмолекулярная структура: компактное расположение структурных псевдокристаллических фрагментов ограничивает их набухание в воде и препятствует проникновению ферментов в полимерную матрицу [23]. Биодеструкцию полимеров часто инициируют такие процессы небактериального характера, как термическое и фотоокисление, термолиз, механическая деградация. Часть этих процессов имеет место при биоразложении органических веществ в условиях окружающей среды и в промышленных установках для биологической переработки органических веществ.

Промышленное компостирование проводят в аэробных условиях в интервале температур 40–60 °C, pH 4,2–8,0, влажности 40–60 % и перемешивании. Эти условия определяют богатый состав микробиоты – присутствуют все группы микроорганизмов-деструкторов (бактерии, в том числе актиномицеты, дрожжеподобные и мицелиальные грибы). Состав и численность представителей этих групп меняется в течение процесса компостирования, однако общее число остается на высоком уровне, поэтому скорость процесса биоразрушения высока, интенсивно протекают и химические процессы.

Анаэробное разрушение органического вещества (в стандарте упомянуто как «биогазификация») также протекает при температуре 30–50 °C, pH 6,0–8,0, влажности 40–80 %, однако в условиях ограничения доступа молекулярного кислорода. В этом случае основу микробиоты составляют микроаэрофильные, факультативно анаэробные и строго анаэробные бактерии.

Особенностью биоразрушения упаковочного материала в условиях свалки и полигона ТКО является колебание условий в очень широких пределах, что может снижать активность и даже исключать протекание микробиологических процессов (например, влажность менее 20 %, температура менее 15 °C). К сожалению, не исключено и попадание упаковочных материалов в объекты окружающей среды, поэтому изучению условий и особенностей биоразрушения их в почве и воде уделяется значительное внимание.

Большинство культивируемых мицелиальных грибов, колонизировавших биоразлагаемые пленки для мульчирования почв, относились к родам *Aspergillus* и *Penicillium*. На структуру микробного сообщества почвы большее влияние оказывали абиотические условия, чем тип обрабатываемого биоразлагаемого материала [24]. Биоразлагаемая пластиковая мульча в компосте разлагается быстрее, чем в почве: деградация, согласно оценке по уменьшению площади поверхности, в компосте колебалась от 85 до 99 % через 18 недель, а в почве от 61 до 83 % в условиях теплого климата и от 26 до 63 % в условиях прохладного климата через 36 месяцев. Показано гидролитическое разложение сложноэфирных связей, наблюдалось значительное снижение молекулярной массы полимеров [25; 26]. При изучении биоразложения пластиков в почве микробиота была менее разнообразна, чем в контроле, после 90 дней инкубации основу сообще-

³Программа разработки государственных стандартов Республики Беларусь на основе международных и европейских стандартов в области установления требований к экологически безопасной (в том числе, биоразлагаемой) упаковке и методам ее испытаний: Госстандарт Республики Беларусь. URL: [https://gosstandart.gov.by/assets/files/MainBottomBanner/Программа%20утвер%20%2025%2002%202020%20\(3\).pdf](https://gosstandart.gov.by/assets/files/MainBottomBanner/Программа%20утвер%20%2025%2002%202020%20(3).pdf) (дата обращения: 05.10.2020).

ства составляли бактерии, отмечено повышение биохимической активности, характерное для метаболизма аминокислот и биodeградации ксенобиотиков [27]. Изучение биоразложения полибутиленадипаттерефталата и полимолочной кислоты в естественной морской среде показало, что по истечении 82 суток не происходило значительной бактериальной деградации, но наблюдались некоторые абиотические изменения (вероятно, из-за процесса фотоокисления). Однако выдерживание в течение того же времени в обогащенной культуре, содержащей пластиковые пленки в качестве основного источника углерода, отмечена потеря веса на 12 %, выделены и идентифицированы бактерии-деструкторы рода *Marinomonas* [28]. В подобном исследовании выделены морские бактерии родов *Alcanivorax*, *Hyphomonas* и *Cycloclasticus*, разлагающие ПЭТФ [29]. Отмечают необходимость тщательного изучения закономерностей биоразложения и разработки подходов для четкого разделения вкладов биотических и абиотических факторов биоразлагаемости [30].

В сложившейся ситуации актуальным является изучение закономерностей и установление механизмов биоразрушения полимерных материалов сапрофитными микроорганизмами-деструкторами в условиях окружающей среды. Цель работы: оценить биоразлагаемость образца упаковочного материала в условиях, приближенных к естественным.

Материалы и методы исследования

Объектом настоящих исследований являлись пакеты для органических отходов размером 56×68 см (производитель – ООО «ЛогоПолимер», г. Логойск, Республика Беларусь), маркированные производителем как изготовленные на основе кукурузы и полностью разлагаемые при промышленном компостировании («OKcompostIndustrial»). В состав их полимерной матрицы входят крахмал, полимолочная кислота, полиэфир терефталевой кислоты, причем крахмал равномерно распределен в материале в виде частиц размером менее 2 мкм. Предмет исследования – процесс биологического разложения образца упаковочного материала в почве и в водной среде.

Изучение биоразлагаемости в почве проводили в двух вариантах условий: приближенных к компостированию на приусадебном участке в теплый период и захоронению в почве. Изучение биоразлагаемости в водной среде также проводили в двух вариантах условий: в полусинтетической жидкой питательной среде под влиянием микробиоты, изначально присутствовавшей на поверхности пленки, и в отстоянной водопроводной воде с внесением активного ила из аэробных биологических очистных сооружений. Эффективность биологического разрушения оценивали путем расчета потери сухой массы полимерного материала, выраженной в процентах относительно начальной массы. Изменения в структуре полимерного материала оценивали визуально путем микроскопирования при увеличении ×400 и ×900. Состав микробиоты в опыте с разрушением материала в отстоянной водопроводной воде оценивали путем посева на полноценные питательные среды для бактерий (питательный агар) и грибов (сусло-агар).

Для изучения биоразлагаемости в почве в первом варианте исследуемые образцы материала, предварительно разрезанные на полосы примерно одинаковой массы ($0,10 \pm 0,010$ г), помещали в пластиковый контейнер (300×200×100 мм) так, чтобы обеспечить их равномерное распределение. Контейнер заполняли почвенно-компостной смесью (зрелый компост смешивали со свежей почвой в соотношении 2:1) равномерно, без уплотнения и устанавливали влажность смеси на уровне 55–60 %. Масса контейнера составляла $2,5 \pm 0,1$ кг. Во избежание чрезмерного подсыхания содержимого контейнер закрывали полиэтиленовой пленкой. Контейнер с образцом выдерживали при температуре 25 ± 2 °C и влажности смеси не менее 50 %. В ходе эксперимента наблюдали за внешним видом образцов материала, при необходимости почвенно-компостную смесь увлажняли водой. Каждый месяц из контейнера извлекали образец, промывали водой, затем анализировали изменение массы и состояния поверхности. Длительность эксперимента составила 3 месяца. Таким образом, наличие питательных веществ и микроорганизмов в составе почвы и компоста, а также поддержание благоприятных для жизнедеятельности микробиоты условий (достаточного увлажнения и рыхлости среды, обеспечивающих доступность кислорода воздуха, а также постоянной температуры) способствовали протеканию в смеси биохимических процессов.

Для изучения биоразлагаемости в почве во втором варианте эксперимента аналогично подготовленные образцы материала помещали в дерново-подзолистую почву на глубину 10–15 см от поверхности вблизи компостной кучи на приусадебном участке, обеспечивая их равномерное распределение. Специальных условий по поливу и разрыхлению (перемешиванию) почвы, созданию и поддержанию определенной температуры не создавали. Длительность эксперимента составила 1 календарный год. По окончании эксперимента образцы извлекли, промыли водой, проанализировали изменение массы и состояния поверхности. Таким образом, в условиях данного эксперимента были обеспечены условия биоразрушения в относительно бедной по содержанию легкоутилизируемых органических веществ почве, а температура и влажность соответствовали условиям окружающей среды. Состав микробиоты и ее активность полностью определялись условиями среды, не были постоянными и нами не контролировались.

Для изучения биоразлагаемости в водной среде в первом варианте пленку подготавливали путем измельчения до крупных (площадью не более 225 см²) и мелких (площадью не более 4 см²) фрагментов. Навески каждой фракции материала отдельно (во всех случаях $2 \pm 0,010$ г) помещали в конические колбы объемом 250 см³, колбы заполняли отстоянной водопроводной водой в количестве 75 см³, однократно вносили 3 см³ аэробного активного ила из городских очистных сооружений г. Минска и помещали в шейкер-инкубатор. Культивирование производили при частоте встряхиваний 90 мин⁻¹ и комнатной температуре (около 22 °C). В течение двух месяцев каждые 7 сут воду в колбах заменяли на свежую, осуществляя визуальный контроль сливаемой жидкости и образца материала. Через 2 месяца образцы извлекали, промывали водой и оценивали потери сухой массы. Микробную суспензию из колб высевали на полноценные питательные среды (питательный агар и сусло-агар) с целью подтверждения наличия жизнеспособных бактерий и грибов соответственно. Таким образом, в условиях эксперимента поддерживали удовлетворительную аэрацию и температуру, процесс вели в жидкой среде, единственным источником питательных веществ для микроорганизмов был образец полимерного материала, а источник микроорганизмов потенциально содержал микроорганизмы всех групп.

Для изучения биоразлагаемости в водной среде во втором варианте создавали более благоприятные условия: исследуемый образец поместили в питательную среду, адаптированную для изучения биоразложения полимолочной кислоты. Питательная среда имела следующий состав, г/дм³: гидролизат казеина – 0,05, $\text{K}_2\text{H}_2\text{PO}_4$ – 2, $\text{K}_2\text{H}_4\text{PO}_4$ – 4, NH_4NO_3 – 1, $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 0,1, $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,0001, $\text{MnSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 0,002, дистиллированная вода – до 1 дм³, pH $7,2 \pm 0,2$. Гидролизат казеина является источником аминокислот и низкомолекулярных пептидов и индуцирует биосинтез протеаз. Для улучшения смачиваемости в среду вносили ПАВ в количестве 0,01 %. Навески материала (во всех случаях $2 \pm 0,010$ г) помещали в конические колбы объемом 250 см³, колбы заполняли жидкой питательной средой в количестве 75 см³ и помещали в шейкер-инкубатор. Культивирование производили при частоте встряхиваний 90 мин⁻¹ и комнатной температуре (около 22 °C). В течение двух месяцев каждые 7 сут воду в колбах заменяли на свежую, осуществляя визуальный контроль сливаемой жидкости и образца материала.

Среднюю убыль массы материала в результате биodeградации рассчитывали как отношение потери массы образца материала в течение эксперимента к его длительности и выражали в %/мес.

Анализ минерального остатка после сжигания образца материала проводили методами энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201 (JEOL, Япония) и масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) на масс-спектрометре вторичных ионов TOF.SIMS 5 для элементного анализа (IONTOF, Германия). Поскольку исследование проводилось с использованием двух методов, то по итогам значения усредняли, в случае обнаружения иона металла только одним из методов вычисление среднего не проводили. Средние значения массовых концентраций элементов сравнивали с требованиями, предъявляемыми к ним в ГОСТ EN 13432–2015.

Результаты исследования и их обсуждение

Изучение биоразлагаемости образцов полимерного материала в почве в первом варианте условий показало, что образцы пленочных изделий в течение первых двух месяцев практически не теряют свою массу: максимальное изменение массы образцов не превышает 1 %, а состояние поверхности пленки существенно не изменяется. При дальнейшем выдерживании на 3-й месяц наблюдается падение массы на 2–4 %, что может быть связано со снижением прочностных характеристик образцов: изделия начинают частично распадаться на небольшие фрагменты, появляются потертости, поверхность становится блеклой. При микроскопировании на поверхности удалось зафиксировать лишь незначительные очаги поражения пленок мицелиальными грибами, хотя другими исследователями отмечалось, что они хорошо развиваются на поверхности полимолочной кислоты и биоразлагаемых полиэфиров терефталевой кислоты [19; 31].

Выдерживание образца полимерного материала в почве в условиях окружающей среды в течение года не привело к значимой потере массы – она не превысила 2 %. В то же время органолептические свойства материала сильно изменились (появился шелест при растирании, цвет из матово-белого стал бежево-коричневым), механическая прочность снизилась, появилась хрупкость. В результате экспозиции материала в почве в местах сгиба образовались продольные трещины, на границах которых заметно стягивание поверхности (рис. 1, а), при большем увеличении выявлена неравномерность (зернистость) материала (рис. 1, б, в).

В результате изучения биоразлагаемости образца материала в водной среде в первом варианте условий установлено, что в течение первых 4-х недель видимых изменений материала не происходило. В случае неизмельченной пленки из образца материала хлопья активного ила скапливались в складках, что, видимо, ухудшало условия снабжения их кислородом и гидродинамический режим. В колбах с измельченной пленкой через 2 недели от начала эксперимента и до его окончания на стенках колбы образовывалось пристеночное кольцо, в результате микроскопирования его соскоба установили, что оно состоит в основном из клеток бактерий и, судя по вязкости, экзополимеров, удерживающих эту биомассу в закрепленном виде. Через 4 недели от начала эксперимента в колбах с измельченной пленкой отметили появление устойчивой пены.

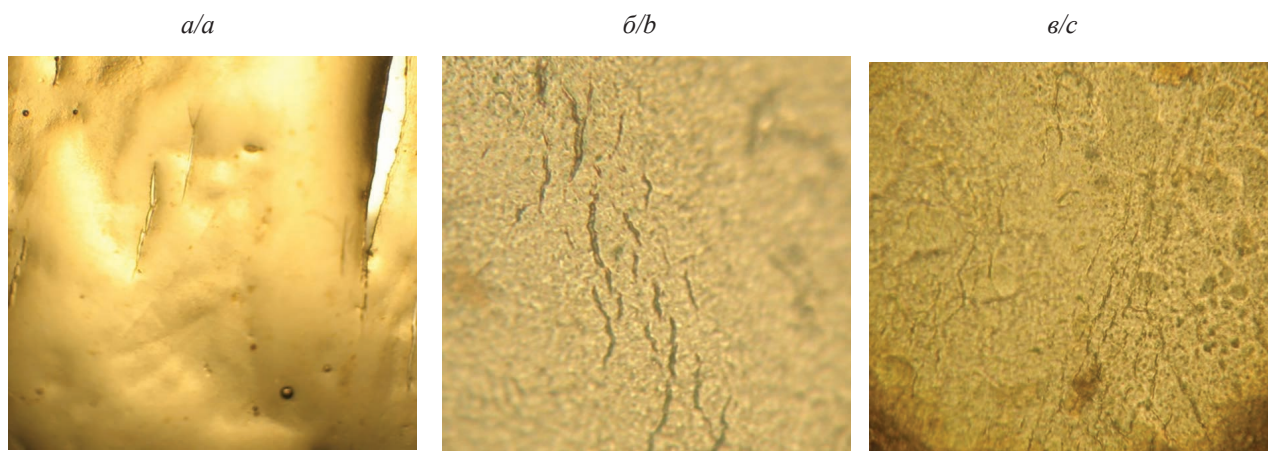


Рис. 1. Изменение структуры поверхности образца материала после экспозиции в увлажненной почве в течение трех месяцев:
 $a - \times 40$, $б, в - \times 400$

Fig. 1. Change in the surface structure of a material sample after exposure in moist soil for 3 months: $a - \times 40$, $b, c - \times 400$

К концу эксперимента пленка и гранулы стали белесыми, однако видимых повреждений и фрагментации не было. Убыль массы образцов составила для дополнительно измельченных пленок 12,5 %, для неизмельченной пленки – 9,5 %.

По окончании данного испытания при высеве суспензии из колб на полноценные питательные среды установлено, что микробиота в основном представлена бактериями. Микроскопирование клеток из колоний показало, что по форме бактерии палочковидные, некоторые из них образуют полимерные внеклеточные метаболиты (рис. 2, $a, б$). На среде для грибов образовались большие выпуклые колонии белого цвета. Характер роста воздушного мицелия позволяет предположить, что микроорганизмы относятся к актиномицетам (порядок *Actinomycetales*) [32]. Исходя из фенотипических особенностей строения мицелия и спорангиев (рис. 2, $в, г$), можно отнести эти бактерии к роду *Streptosporangium*. Согласно исследованиям других авторов [33], большинство изолированных микроорганизмов, способных разлагать полимолочную кислоту, относятся к актиномицетам.

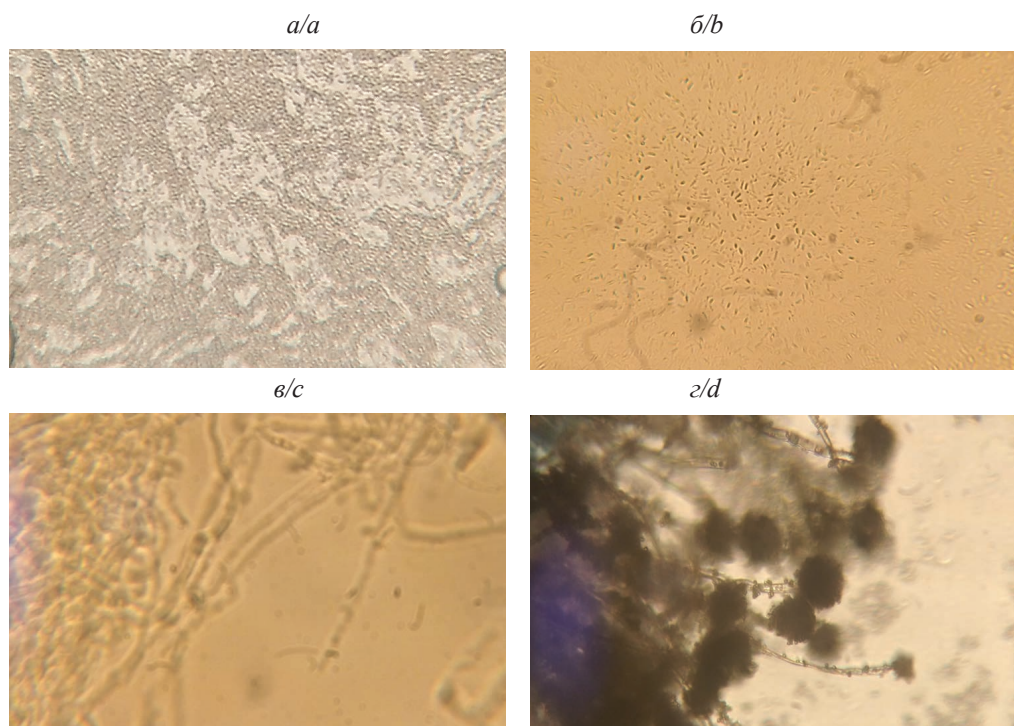


Рис. 2. Микрофотографии клеток бактерий из колоний, образовавшихся на питательном агаре ($a, б$); мицелий ($в$) и спорангии ($г$) актиномицетов из колоний с сусло-агара ($\times 900$)

Fig. 2. Micrographs of bacterial cells from colonies, formed on nutrient agar ($a, б$); mycelium (c) and sporangia (d) of actinomycetes from colonies with wort agar ($\times 900$)

В результате изучения биodeградации образца материала в жидкой питательной среде, адаптированной для изучения процессов разложения полимолочной кислоты, выяснили, что полное разрушение образца (до неидентифицируемых визуально фрагментов) происходило за 2 недели. Анализ чистых культур микроорганизмов показал, что при различной морфологии колоний вся микробиота представлена бактериями.

Для анализа полученной информации результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1

Сопоставление условий и результата биоразрушения образца материала

Table 1

Comparison of the conditions and the result of material biodegradation

Вариант условий изучения био-разложения Показатели и характеристики	В почве в условиях		В водной среде, состав среды	
	окружающей среды	компостирования в лаборатории	отстоянная водопроводная вода, внешний источник микробиоты	биогенные элементы и источник пептидов условия асептики
Условия эксперимента				
Температура, °С	(–5) – (+25)	+25	+22	+30
Влажность	Колебания в широ-ких пределах	Поддерживалась на уровне 55–60 %	Образец полностью погружен в жидкость	
Дополнительный субстрат	Целлюлоза, гемицеллюлозы, лигнин в составе растительных остатков		Отсутствует	Гидролизат казеина
Результат биоразрушения				
Средняя убыль массы, %/мес	0,2	1,0	5,0	100,0
Изменение органолептических характеристик	Потемнение, растрескивание, хрупкость	Белесость, фрагментация	Белесость	Растворение

Согласно полученным результатам, к ускорению биоразрушения полимерного материала приводит увеличение влажности и повышение температуры. Началом разрушения крахмала в составе образца материала является смачивание и последующее набухание, что сопровождается побледнением материала. Процесс биodeградации крахмала оказался весьма затруднен ввиду включения гранул в полимерную матрицу полилактида и полиэфира терефталевой кислоты. В присутствии в качестве косубстрата гидролизата казеина разрушение полимерной матрицы заметно ускоряется.

Интересной особенностью биоразрушения образца полимерного материала стало отсутствие в составе спонтанно развивающегося сообщества микроорганизмов-деструкторов представителей дрожжеподобных и мицелиальных грибов, обладающих широким спектром литических ферментов и практически всегда присутствующих при компостировании.

Изменение влажности среды в эксперименте с почвой привела к охрупчиванию и растрескиванию материала с деформированием (стягиванием) краев. Такое явление наблюдается, например, при черствении хлеба, когда набухший крахмал муки утрачивает связанную воду.

Из литературы известно, что развитие мицелиальных грибов может подавляться рядом присутствующих в составе материала минеральных компонентов (ионов меди, кобальта, цинка [34]). В связи с этим представляло интерес установление минерального состава зольного остатка полимерного материала (табл. 2).

Результаты анализа свидетельствуют, что элементный состав зольного остатка соответствует требованиям стандарта, предъявляемым к упаковке для признания ее биоразлагаемой: содержание тяжелых металлов (цинка, меди, алюминия, титана) не превышает пределы по ГОСТ EN13432–2015. Для проявления материалом выраженной фунгистатической активности концентрации меди, кобальта и цинка сравнительно малы. Содержание калия, натрия, фосфора, кальция, магния, кремния, серы, железа и кобальта в составе образца материала невелико и сопоставимо с таковым для растительного сырья.

Согласно литературным данным, оксид алюминия используется для биосинтеза полилактидов [13]. Оксиды цинка и титана часто применяются для придания материалам белого цвета, кроме того, оксид титана обеспечивает УФ-защиту материала от старения. Считают важным создание защиты полилактида от ультрафиолета [35]. В недавнем исследовании свойств системы «титан–полилактид» показаны значительные химические и микроструктурные изменения в полимере, приведшие к заметному улучшению механических свойств и повышению устойчивости к разрушению по сравнению с чистым полилактидом. Показано, что полученный материал является биосовместимым и нетоксичным [36]. Авторами [37] не

зафиксировано фунгистатической активности по отношению к тестовым культурам грибов, наночастиц оксидов титана и кремния (при размере частиц 100–120 и 10–15 нм и их концентрациях до 1000 мг/дм³). Однако есть работы, в которых изучается антибактериальная активность нанокompозитных фотокатализаторов на основе диоксида титана [38], продемонстрировано фотоинактивирующее действие на клетки микроскопических грибов активных форм кислорода, образующихся на поверхности этого соединения [39]. В них отмечается, что более крупные клетки дрожжей интенсивнее атакуются активными формами кислорода, возникающими на поверхности фотокатализатора, и большая площадь поверхности плазматической мембраны дрожжевой клетки увеличивает вероятность ее разрушения.

Таблица 2

Элементный состав зольного остатка образца полимерного материала

Table 2

Elemental composition of the ash residue of polymer material sample

Детектируемый элемент	Концентрация элемента (мг/кг) при анализе минерального остатка методом		Усредненное значение концентрации элемента (мг/кг)	Допустимая концентрация элемента по ГОСТ EN13432–2015 (мг/кг)
	EDX	SIMS		
Ti	570	411	490	Не регламентируется
Al	36	19	28	То же
K	45	107	152	То же
Si	13	27	20	То же
P	20	Не обнаружен	20	То же
S	30	Не обнаружен	30	То же
Na	14	56	35	То же
Ca	13	31	22	То же
Mg	6	52	58	То же
Fe	9	20	15	То же
Co	Не обнаружен	1	1	То же
Cr	Не обнаружен	2	2	50
Cu	34	2	18	50
Ni	Не обнаружен	1	1	25
Zn	28	Не обнаружен	28	150

Таким образом, основываясь на ряде литературных данных, можно предположить, что практически полное отсутствие грибной микробиоты в исследованных образцах полимерного материала, подвергнувшегося биодеградации, является результатом фотокаталитической активности входящего в его состав диоксида титана.

Заключение

На основании результатов проведенных исследований по биодеградации полимерного упаковочного материала, в состав которого входят крахмал, полилактид и полиэфир терефталевой кислоты, нами сделаны определенные выводы.

Установлено, что при длительной экспозиции материала, помещенного в почву, в условиях окружающей среды скорость его биодеградации невелика, и убыль массы образца составляет не более 0,2 % в месяц. Значительно повысить эффективность процесса биоразложения позволяет поддержание благоприятных для развития микроорганизмов-деструкторов условий (температуры около 25 °С, влажности среды на уровне 55–60 % и беспрепятственного обеспечения кислородом воздуха). Большое значение имеет также внесение в почву субстрата, богатого микробиотой (компоста).

В условиях жидкофазного процесса на степень и скорость биодеструкции в значительной степени влияет состав среды. Так, использование адаптированной для разложения полилактида питательной среды с внесением гидролизата казеина в качестве дополнительного субстрата позволило достичь полного

разрушения структуры материала в короткий период времени (не более 14 сут) при помощи спонтанно развивающегося биоценоза микроорганизмов. В то же время в бедной питательными веществами среде процесс деградации полимера идет медленно и убыль массы составляет не более 5 % в месяц, несмотря на использование богатого микробиотой активного ила очистных сооружений.

Установлено, что основную роль в процессе биodeградации играют бактерии. В исследованных образцах микробных суспензий и частично деградированного материала практически не обнаружено дрожжеподобных и мицелиальных грибов. Исследован элементный состав зольного остатка образца полимерного материала. Показано, что качественный и количественный состав зольного остатка соответствует требованиям стандарта для биоразлагаемой упаковки. Сделано предположение, что фунгистатические свойства полимерного материала могут быть обусловлены фотокаталитической активностью входящего в его состав диоксида титана.

Библиографические ссылки

1. Kassouf A, Maalouly J, Rutledge DN, Chebib H, Ducruet V. Rapid discrimination of plastic packaging materials using MIR spectroscopy coupled with independent components analysis (ICA). *Waste Management*. 2014;34(11):2131–2138. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.06.015.
2. Horodytska O, Valdés FJ, Fullana A. Plastic flexible films waste management – A state of art review. *Waste Management*. 2018;77:413–425. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.04.023.
3. Schyns ZOG, Shaver MP. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromolecular Rapid Communications*. 2021;42(3). DOI: 10.1002/marc.202000415.
4. Antonopoulos I, Faraca G, Tonini D. Recycling of post-consumer plastic packaging waste in the EU: Recovery rates, material flows, and barriers. *Waste Management*. 2021;126:694–705. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.04.002.
5. Dahlbo H, Poliakova V, Mylläri V, Sahimaa O, Anderson R. Recycling potential of post-consumer plastic packaging waste in Finland. *Waste Management*. 2018;71:52–61. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.10.033.
6. Beghetto V, Sole R., Buranello Ch, Al-Abkal M, Facchin M. Recent Advancements in Plastic Packaging Recycling: A Mini-Review. *Materials*. 2021;14(17):4782. DOI: 10.3390/ma14174782.
7. Siddique R, Khatib J, Kaur I. Use of recycled plastic in concrete: a review. *Waste Management*. 2008;28(10):1835–1852. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.09.011.
8. Клинков АС, Беляев ПС, Скуратов ВК, Соколов МВ, Ефремов ОВ, Однолько ВГ. *Рециклинг и утилизация тары и упаковки*. Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО «ТГТУ»; 2010.
9. О поэтапном снижении использования полимерной упаковки: Постановление Совета министров Республики Беларусь, 13.01.2020, № 7 [Интернет]. *Национальной правовой Интернет-портал Республики Беларусь*. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22000007&p1=1> (дата обращения: 15 февраля 2021).
10. Рымовская МВ, Раткевич МВ, Петрушеня АФ, Гребенчикова ИА, Сергиевич ДС, Рагатка ДА. Состав, свойства и биологическое разрушение упаковочного материала на основе кукурузы. В: *Технология органических веществ: материалы 85-ой научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием)*. Минск, 1–13 февраля 2021 г. Минск: БГТУ; 2021. с. 360–362.
11. Biopolymers facts and statistics 2020 Production capacities, processing routes, feedstock, land and water use [Internet; cited 2020 November 20]. Available from: https://www.ifbb-hannover.de/files/IfBB/downloads/faltblaetter_broschuere/f+s/Biopolymers-Facts-Statistics-2020.pdf.
12. Sheehan RJ. Terephthalic Acid, Dimethyl Terephthalate, and Isophthalic Acid. In: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 2011. DOI: 10.1002/14356007.a26_193.pub2.
13. Желифонова ВП, Антипова ТВ, Зайцев КВ, Недорезова РМ, и др. В: Биохимия, физиология и биосферная роль микроорганизмов. *Текст доклада в рамках работы V Пуцунской школы-конференции*. Пуцун, 3–7 декабря 2018. [Интернет]. Интеллектуальная система тематического исследования наукометрических данных. URL: <https://istina.msu.ru/conferences/presentations/161190785/> (дата обращения: 05 октября 2021).
14. Попов АА, Лихачев АН, Масталыгина ЕЕ. Влияние наполнителей природного происхождения для биodeградируемых композиций на основе синтетических полимеров на рост и биологическую активность тест-культур микромицетов. В: *Полимеры-2014. Тезисы стендовых докладов Всероссийской Каргинской конференции*. Москва, 27–31 января 2014 г. Том 2. Часть I. Москва: [б. и.]; 2014. с. 510.
15. Тертышная ЮВ, Подзорова МВ, Шибряева ЛС, Попов АА. Биодеструкция тонких пленок на основе полилактида и поли-3-гидроксибутирата. В: *Полимеры-2014. Тезисы стендовых докладов шестой Всероссийской Каргинской конференции*. Москва, 27–31 января 2014 г. Том 2. Часть I. Москва: [б. и.]; 2014. с. 525.
16. Dąbrowska GB, Janczak K, Richert A. Combined use of Bacillus strains and Miscanthus for accelerating biodegradation of poly(lactic acid) and poly(ethylene terephthalate). *PeerJ. Life and Environment (open access journal)*. 2021;3. DOI: 10.7717/peerj.10957.
17. Arena M, Abbate C, Fukushima K, Gennari M. Degradation of poly (lactic acid) and nanocomposites by Bacillus licheniformis. *Environmental Science and Pollution Research*. 2011;18(6):865–870. DOI: 10.1007/s11356-011-0443-2.
18. Magalhães RP, Orge Cunha JM, Sousa SF. Perspectives on the Role of Enzymatic Biocatalysis for the Degradation of Plastic PET. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(20):11257. DOI: 10.3390/ijms222011257.
19. Zumstein MTh, Schintlmeister A, Nelson TF, Baumgartner R, Woebken D, et al. Biodegradation of synthetic polymers in soils: Tracking carbon into CO₂ and microbial biomass. *Science Advances*. 2018;4(7). DOI: 10.1126/sciadv.aas9024.
20. Mohanan N, Montazer Z, Sharma PK, Levin DB. Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics. *Frontiers in Microbiology*. 2020;11. DOI: 10.3389/fmicb.2020.580709
21. Yuanze S, Chongxue D, Na C, et al. Biodegradable and conventional microplastics exhibit distinct microbiome, functionality, and metabolome changes in soil. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;424(Pt A):127282. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127282.
22. Fu Y, Wu G, Bian X, Zeng J, Weng Y. Biodegradation Behavior of Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT), Poly(Lactic Acid) (PLA), and Their Blend in Freshwater with Sediment. *Molecules*. 2020;25(17):3946. DOI: 10.3390/molecules25173946.

23. Mohanan N, Montazer Z, Sharma PK, Levin DB. Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics. *Frontiers in Microbiology*. 2020;11:580709. DOI: 10.3389/fmicb.2020.580709.
24. Moore-Kucera J, Cox SB, Peyron M, Bailes G, et al. Native soil fungi associated with compostable plastics in three contrasting agricultural settings. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2014;98(14):6467–6485. DOI: 10.1007/s00253-014-5711-x.
25. Sintim HY, Bary AI, Hayes DG, Wadsworth LC, et al. In situ degradation of biodegradable plastic mulch films in compost and agricultural soils. *Science of the Total Environment*. 2020;727:138668. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138668.
26. Mohanan N, Montazer Z, Sharma PK, Levin D. B. Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics. *Frontiers in Microbiology*. 2020;11:580709. DOI: 10.3389/fmicb.2020.580709.
27. Huang Y, Zhao Y, Wang J, Zhang M, Jia W, Qin X. LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil. *Environmental Pollution*. 2019;254(Pt A):112983. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.112983.
28. Delacuvellerie A, Benali S, Cyriaque V, Moins S, Raquez J.-M, Gobert S, Wattiez R. Microbial biofilm composition and polymer degradation of compostable and non-compostable plastics immersed in the marine environment. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;419:126526. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126526.
29. Denaro R, Aulenta F, Crisafi F, Pippo FD, et al. Marine hydrocarbon-degrading bacteria breakdown poly(ethylene terephthalate) (PET). *Science of the Total Environment*. 2020;749:141608. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141608.
30. Lear G, Kingsbury JM, Franchini S, Gambarini V, Maday SDM, Wallbank JA, et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome*. 2021;16(1):2. DOI: 10.1186/s40793-020-00371-w.
31. Hosni ASA, Pittman JK, Robson GD. Microbial degradation of four biodegradable polymers in soil and compost demonstrating polycaprolactone as an ideal compostable plastic. *Waste Management*. 2019;97:105–114. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.07.042.
32. Хоулт Дж, Криг Н, Смит П, Стейли Дж, Уильямс С, редакторы. Определитель бактерий Берджи. Том 2. [перевод с английского]. Москва: Мир; 1997. 368 с.
33. Li F, Wang S, Liu W, Chen G. Progress on biodegradation of polylactic acid – a review. *Acta Microbiologica Sinica*. 2008;48(2):262–268.
34. Багаева ТВ, Ионова НЭ, Надеева ГВ. Микробиологическая ремедиация природных систем от тяжелых металлов. Казань: Казанский университет; 2013. с. 8–10.
35. Narayanan M, Loganathan S, Valapa RB, Thomas S, Varghese TO. UV protective poly(lactic acid)/rosin films for sustainable packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2017;99:37–45. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2017.01.152.
36. Nguyen VP, Yoo J, Lee JY, Chung JJ, et al. Enhanced Mechanical Stability and Biodegradability of Ti-Infiltrated Polylactide. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020;12(39):43501–43512. DOI: 10.1021/acsami.0c13246.
37. Асанова АА, Полонский ВИ, Мануковский НС, Хижняк СВ. Фунгистатическая активность техногенных наночастиц. *Российские нанотехнологии*. 2018;13(5–6):62–66.
38. Skorb EV, Antonouskaya LI, Belyasova NA, Shchukin DG, et al. Antibacterial activity of thin-film photocatalysts based on metal-modified TiO₂ and TiO₂:In₂O₃ nanocomposite. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2008;84(1–2):94–99.
39. Скорб ЕВ, Манько ЮМ, Белясова НА, Свиридов ДВ. Фотоинактивация клеток дрожжей в присутствии диоксида титана. В: *Свиридовские чтения. Выпуск 7*. Минск: БГУ; 2011. с. 101–106.

References

1. Kassouf A, Maalouly J, Rutledge DN, Chebib H, Ducruet V. Rapid discrimination of plastic packaging materials using MIR spectroscopy coupled with independent components analysis (ICA). *Waste Management*. 2014;34(11):2131–2138. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.06.015.
2. Horodytska O, Valdés FJ, Fullana A. Plastic flexible films waste management – A state of art review. *Waste Management*. 2018;77:413–425. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.04.023.
3. Schyns ZOG, Shaver MP. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromolecular Rapid Communications*. 2021;42(3). DOI: 10.1002/marc.202000415.
4. Antonopoulos I, Faraca G, Tonini D. Recycling of post-consumer plastic packaging waste in the EU: Recovery rates, material flows, and barriers. *Waste Management*. 2021;126:694–705. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.04.002.
5. Dahlbo H, Poliakova V, Mylläri V, Sahimaa O, Anderson R. Recycling potential of post-consumer plastic packaging waste in Finland. *Waste Management*. 2018;71:52–61. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.10.033.
6. Beghetto V, Sole R., Buranello Ch, Al-Abkal M, Facchin M. Recent Advancements in Plastic Packaging Recycling: A Mini-Review. *Materials*. 2021;14(7):4782. DOI: 10.3390/ma14174782.
7. Siddique R, Khatib J, Kaur I. Use of recycled plastic in concrete: a review. *Waste Management*. 2008;28(10):1835–1852. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.09.011.
8. Klinkov AS, Belyaev PS, Skuratov VK, Sokolov MV, Efremov OV, Odnol'ko VG. *Retsikling i utilizatsiya tary i upakovki: uchebnoe posobie* [Recycling and utilization of containers and packaging: a tutorial]. Tambov: Izdatelstvo GOU VPO «TGTU»; 2010. Russian.
9. *O poetapnom snizhenii ispol'zovaniya polimernoi upakovki* [On the gradual reduction in the use of polymer packaging]; Postanovlenie Soveta ministrov Respubliki Belarus' [Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus], 13.01.2020, № 7 [Internet]. *Natsionalnoy pravovoi Internet-portal Respubliki Belarus* [National legal Internet portal Resp. Belarus]. [Cited 2021 February 15]. Available from: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22000007&p1=1>.
10. Rymovskaya MV, Ratkevich MV, Petrushenya AF, Grebenchikova IA, Sergievich DS, Ragatka DA. Sostav, svoystva i biologicheskoe razrushenie upakovochного materiala na osnove kukuruzy [Composition, properties and biological destruction of packaging material based on corn]. In: *Tekhnologiya organicheskikh veshchestv: materialy 85-oi nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhnatsionnym uchastiem)* [Technology of organic substances: materials of the 85th scientific-technical conferences of faculty members, researchers and graduate students (with international participation)]. Minsk, 2021 February 1–13. Minsk: BGUTU; 2021. p. 360–362. Russian.
11. Biopolymers facts and statistics 2020 Production capacities, processing routes, feedstock, land and water use [Internet; cited 2020 November 20]. Available from: https://www.ifbb-hannover.de/files/IfBB/downloads/faltblaetter_broschueren/f+s/Biopolymers-Facts-Statistics-2020.pdf. Russian.
12. Sheehan RJ. Terephthalic Acid, Dimethyl Terephthalate, and Isophthalic Acid. In: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 2011. DOI: 10.1002/14356007.a26_193.pub2.

13. Zhelifonova VP, Antipova TV, Zaitsev KV, Nedorezova RM, et al. Biodegradatsiya gribami obraztsov polikaprolaktona i polilaktida [Biodegradation by fungi of polycaprolactone and polylactide samples]. In: *Biokhimiya, fiziologiya i biosferная rol' mikroorganizmov: tekst doklada v ramkakh raboty V Pushchinskoi shkoly-konferentsii* [Biochemistry, physiology and biospheric role of microorganisms: text of the report within the framework of the V Pushchino school-conference]. Pushchino, 2018 December 3–7. [Internet]. Intellektual'naya sistema temacheskogo issledovaniya naukometricheskikh dannyykh [Cited 2021 October 05]. Available from: <https://istina.msu.ru/conferences/presentations/161190785/> Russian.
14. Popov AA, Likhachev AN, Mastalygina EE. Vliyaniye napolnitelei prirodnogo proiskhozhdeniya dlya biodegradiruemyykh kompozitsii na osnove sinteticheskikh polimerov na rost i biologicheskuyu aktivnost' test-kul'tur mikromitsetov [Influence of natural fillers for biodegradable compositions based on synthetic polymers on the growth and biological activity of test cultures of micromycetes]. In: *Polimery-2014. Tezisy stendovyykh dokladov Vserossiiskoi Karginskoi konferentsii* [Polymers-2014: abstracts of poster presentations of the sixth All-Russian Karginy conference, Moscow, 2014 January, 27–31]. Volume 2. Part 1. Moscow: [publisher unknown]; 2014. p. 510. Russian.
15. Tertyshnaya YuV, Podzorova MV, Shibryaeva LS, Popov AA. Biodestruktsiya tonkikh plenok na osnove polilaktida i poli-3-gidroksibutirata [Biodegradation of thin films based on polylactide and poly-3-hydroxybutyrate]. In: *Polimery-2014: tezisy stendovyykh dokladov shestoi Vserossiiskoi Karginskoi konferentsii* [Polymers-2014: abstracts of poster presentations of the sixth All-Russian Karginy conference, Moscow, 2014 January, 27–31]. Volume 2. Part 1. Moscow: [publisher unknown]; 2014. p. 525. Russian.
16. Dąbrowska GB, Janczak K, Richert A. Combined use of Bacillus strains and Miscanthus for accelerating biodegradation of poly(lactic acid) and poly(ethylene terephthalate). *PeerJ. Life and Environment (open access journal)*. 2021;3. DOI: 10.7717/peerj.10957.
17. Arena M, Abbate C, Fukushima K, Gennari M. Degradation of poly (lactic acid) and nanocomposites by Bacillus licheniformis. *Environmental Science and Pollution Research*. 2011;18(6):865–870. DOI: 10.1007/s11356-011-0443-2.
18. Magalhães RP, orge Cunha JM, Sousa SF. Perspectives on the Role of Enzymatic Biocatalysis for the Degradation of Plastic PET. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(20):11257. DOI: 10.3390/ijms222011257.
19. Zumstein MTh, Schintlmeister A, Nelson TF, Baumgartner R, Woebken D, et al. Biodegradation of synthetic polymers in soils: Tracking carbon into CO₂ and microbial biomass. *Science Advances*. 2018;4(7). DOI: 10.1126/sciadv.aas9024.
20. Mohanan N, Montazer Z, Sharma PK, Levin DB. Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics. *Frontiers in Microbiology*. 2020;11. DOI: 10.3389/fmicb.2020.580709
21. Yuanze S, Chongxue D, Na C, et al. Biodegradable and conventional microplastics exhibit distinct microbiome, functionality, and metabolome changes in soil. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;424(Pt A):127282. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127282.
22. Fu Y, Wu G, Bian X, Zeng J, Weng Y. Biodegradation Behavior of Poly(Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT), Poly(Lactic Acid) (PLA), and Their Blend in Freshwater with Sediment. *Molecules*. 2020;25(17):3946. DOI: 10.3390/molecules25173946.
23. Mohanan N, Montazer Z, Sharma PK, Levin DB. Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics. *Frontiers in Microbiology*. 2020;11:580709. DOI: 10.3389/fmicb.2020.580709.
24. Moore-Kucera J, Cox SB, Peyron M, Bailes G, et al. Native soil fungi associated with compostable plastics in three contrasting agricultural settings. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2014;98(14):6467–6485. DOI: 10.1007/s00253-014-5711-x.
25. Sintim HY, Bary AI, Hayes DG, Wadsworth LC, et al. In situ degradation of biodegradable plastic mulch films in compost and agricultural soils. *Science of the Total Environment*. 2020;727:138668. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138668.
26. Mohanan N, Montazer Z, Sharma PK, Levin D. B. Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics. *Frontiers in Microbiology*. 2020;11:580709. DOI: 10.3389/fmicb.2020.580709.
27. Huang Y, Zhao Y, Wang J, Zhang M, Jia W, Qin X. LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil. *Environmental Pollution*. 2019;254(Pt A):112983. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.112983.
28. Delacuvellerie A, Benali S, Cyriaque V, Moins S, Raquez J.-M, Gobert S, Wattiez R. Microbial biofilm composition and polymer degradation of compostable and non-compostable plastics immersed in the marine environment. *Journal of Hazardous Materials*. 2021;419:126526. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126526.
29. Denaro R, Aulenta F, Crisafi F, Pippo FD, et al. Marine hydrocarbon-degrading bacteria breakdown poly(ethylene terephthalate) (PET). *Science of the Total Environment*. 2020;749:141608. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141608.
30. Lear G, Kingsbury JM, Franchini S, Gambarini V, Maday SDM, Wallbank JA, et al. Plastics and the microbiome: impacts and solutions. *Environmental Microbiome*. 2021;16(1):2. DOI: 10.1186/s40793-020-00371-w.
31. Hosni ASA, Pittman JK, Robson GD. Microbial degradation of four biodegradable polymers in soil and compost demonstrating polycaprolactone as an ideal compostable plastic. *Waste Management*. 2019;97:105–114. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.07.042.
32. Khoulit Dzh, Krig N, Smit P, Steyli Dzh, Uill'yams S, editors. *Opredelitel' bakteriy Berdzhii* [Bergey's Keys to Bacteria]. Volume 2. Moscow: Mir; 1997. 368 p. Russian.
33. Li F, Wang S, Liu W, Chen G. Progress on biodegradation of polylactic acid – a review. *Acta Microbiologica Sinica*. 2008;48(2):262–268.
34. Bagaeva TV, Ionova NE, Nadeeva GV. *Mikrobiologicheskaya remediatsiya prirodnyykh sistem ot tyazhelykh metallov* [Microbiological remediation of natural systems from heavy metals]. Kazan': Kazanskiy universitet; 2013. p. 8–10. Russian.
35. Narayanan M, Loganathan S, Valapa RB, Thomas S, Varghese TO. UV protective poly(lactic acid)/rosin films for sustainable packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2017;99:37–45. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2017.01.152.
36. Nguyen VP, Yoo J, Lee JY, Chung JJ, et al. Enhanced Mechanical Stability and Biodegradability of Ti-Infiltrated Polylactide. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020;12(39):43501–43512. DOI: 10.1021/acsami.0c13246.
37. Asanova AA, Polonskiy VI, Manukovskiy NS, Khizhnyak SV. Fungistaticheskaya aktivnost' tekhnogennykh nanochastits [Fungistatic activity of technogenic nanoparticles]. *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnology]. 2018;13(5–6):62–66. Russian.
38. Skorb EV, Antonouskaya LI, Belyasova NA, Shchukin DG, et al. Antibacterial activity of thin-film photocatalysts based on metal-modified TiO₂ and TiO₂/In₂O₃ nanocomposite. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2008;84(1–2):94–99.
39. Skorb EV, Manko YM, Belyasova NA, Sviridov DV. Yeast photoinactivation in the presence of titanium dioxide. In: *Sviridov readings. Issue 6*. Minsk: BGU; 2010. p.101–106. Russian.

СОДЕРЖАНИЕ

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Чикова Т. С., Головатый С. Е., Маскевич С. А. Профессиональные компетенции инженера-эколога и необходимые для их формирования знания физики	4
Дзятковская Е. Н., Длимбетова Г. К., Дзятковский А. Д. Доступное образование: проектирование образовательной среды для устойчивого развития	20

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

Крюк Д. В., Жукова А. А. Биотопическое распространение инвазивного вида – <i>Dreissena polymorpha</i> (Mollusca, Bivalvia) в озере Нарочь (Беларусь) в 2016–2017 гг.	28
Сергеева Т. П., Лозинская О. В., Смирнова Е. Г. Жизненные формы прямокрылых (Orthoptera) Беларуси как показатель их адаптивных возможностей и биоиндикационных качеств	36
Сахвон В. В. Особенности гнездования черного дрозда (<i>Turdus merula</i>) в условиях городских древесных насаждений г. Минска	46
Бутько А. А., Родькин О. И., Ракович В. А., Маркитантов Н. Р. Оценка влияния уровня минерального питания на морфологические параметры и аккумуляцию биогенных элементов в биомассе быстрорастущей ивы	54

МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

Мыслыва Т. Н., Левшук О. Н. Канцерогенный и неканцерогенный риск для населения от потребления картофеля и овощей, выращиваемых в пределах агроселитебных ландшафтов	65
---	----

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

Самусик Е. А., Головатый С. Е. Тяжелые металлы в почвах и в растениях пшеницы в зоне воздействия предприятия по производству строительных материалов	76
Голод Ю. В., Дубенок С. А. Совершенствование методических подходов к учету хозяйственно-бытовых сточных вод, поступающих на очистные сооружения населенных пунктов Республики Беларусь	89
Рымовская М. В., Раткевич М. В., Гребенчикова И. А., Сергеевич Д. С. Биологическое разрушение полимерной упаковки в условиях, приближенных к естественным	103

CONTENTS

SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

<i>Chikova T. S., Golovaty S. E., Maskevich S. A.</i> Professional competences of environmental engineer and the knowledge of physics required for their formation.....	4
<i>Dziatkovskaya E. N., Dlimbetova G. K., Dziatkovskii A. D.</i> Accessible education: designing the educational environment for sustainable development.....	20

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

<i>Kryuk D. V., Zhukava H. A.</i> Biotopic distribution of invasive species – <i>Dressena polymorpha</i> (Mollusca, Bivalvia) in lake Naroch (Belarus) in 2016–2017	28
<i>Sergeeva T. P., Lozinskaya O. V., Smirnova E. G.</i> Life forms of Orthoptera Belarus as an indicator of their adaptive capabilities and bioindicative qualities.....	36
<i>Sakhvon V. V.</i> Nesting features of blackbird (<i>Turdus merula</i>) in urban green spaces in Minsk.....	46
<i>Butsko A. A., Rodzkin A. I., Rakovich V. A., Markitantov N. R.</i> Assessment of the influence of the level of mineral nutrition on the morphological parameters and accumulation of biogenous elements in the biomass of the fast-growing willow.....	54

MEDICAL ECOLOGY

<i>Myslyva T. N., Levshuk O. N.</i> Carcinogenic and non-carcinogenic risk for the population from the consumption of potatoes and vegetables growing within the limits of agro-residential landscapes.....	65
---	----

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

<i>Samusik E. A., Golovaty S. E.</i> Heavy metals in soils and wheat plants in the area of influence of a building materials enterprise	76
<i>Holad Yu. V., Dubianok S. A.</i> Improvement of methodological approaches to accounting of household wastewater supplied to treatment facilities in settlements of the Republic of Belarus	89
<i>Rymovskaya M. V., Ratkevich M. V., Grebenchikova I. A., Sergievich D. S.</i> Polymer package biological destruction at conditions approximated to natural.....	103

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.
№ 4. 2021**

Учредитель:
Белорусский государственный университет

Юридический адрес: пр. Независимости, 4,
220030, Минск.

Почтовый адрес: ул. Долгобродская, 23/1,
220070, Минск.

Тел. 398-89-34, 398-93-44.

www.iseu.bsu.by

E-mail: jecology@bsu.by

«Журнал Белорусского государственного
университета. Экология» издается с сентября 2017 г.

До августа 2017 г. выходил под названием
«Экологический вестник»
(ISSN 1994-2087).

Редактор *Л. М. Корневская*
Технический редактор *М. Ю. Мошкова*
Корректор *М. Ю. Мошкова*

Подписано в печать 25.12.2021.

Тираж 100 экз. **Заказ**.

Республиканское унитарное предприятие
«Информационно-вычислительный центр
Министерства финансов Республики Беларусь»
ЛП № 02330/89 от 3 марта 2014.
Ул. Кальварийская, 17, 220004, Минск.

© БГУ, 2021

**Journal
of the Belarusian State University. Ecology.
No. 4. 2021**

Founder:
Belarusian State University

Registered address: 4 Niezaliežnasci Ave.,
220030, Minsk.

Correspondence address: 23/1 Daŭhabrodskaja Str.,
220070, Minsk.

Tel. 398-89-34, 398-93-44.

www.iseu.bsu.by

E-mail: jecology@bsu.by

«Journal of the Belarusian State University. Ecology»
published since September, 2017.

Until August, 2017 named «Ekologičeskii vestnik»
(ISSN 1994-2087).

Editor *L. M. Korenevskaya*
Technical editor *M. Yu. Moshkova*
Proofreader *M. Yu. Moshkova*

Signed print 25.12.2021.

Edition 100 copies. **Order number**.

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, 2021