



БЕЛОРУССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

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

1

2025

МИНСК
БГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор	РОДЬКИН О. И. – доктор биологических наук, доцент; директор Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. E-mail: info@iseu.by
Заместитель главного редактора	ГЕРМЕНЧУК М. Г. – кандидат технических наук, доцент; заместитель директора по научной работе Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. E-mail: germenchuk@iseu.by
Ответственный секретарь	ЛОЗИНСКАЯ О. В. – старший преподаватель кафедры общей биологии и генетики Международного государственного экологического института им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь. E-mail: aromia@rambler.ru
<i>Батян А. Н.</i>	Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Головатый С. Е.</i>	Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Голубев А. П.</i>	Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Гричик В. В.</i>	Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Дардынская И. В.</i>	Центр всемирного здоровья «Великие озера», Чикаго, США.
<i>Дзятковская Е. Н.</i>	Институт стратегии развития образования Российской академии образования, Москва, Россия.
<i>Дроздович В. В.</i>	Национальный институт рака, США, Бетесда.
<i>Зафранская М. М.</i>	Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь.
<i>Кильчевский А. В.</i>	Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.
<i>Коноплев А. В.</i>	Институт радиоактивности окружающей среды университета г. Фукусима, Япония.
<i>Коровин Ю. А.</i>	Обнинский институт атомной энергетики – Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Обнинск, Россия.
<i>Ленгфельдер Э.</i>	Радиологический институт здоровья и окружающей среды им. Отто Хуга, Мюнхен, Германия.
<i>Либератос Г.</i>	Афинский технический университет, Афины, Греция.
<i>Линге И. И.</i>	Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия.
<i>Лукашенко С. Н.</i>	Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия.
<i>Логинов В. Ф.</i>	Национальная академия наук Беларуси, Минск, Беларусь.
<i>Медведев С. В.</i>	ГНУ «Объединенный институт проблем информатики» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь.
<i>Набиев И. Р.</i>	Реймский университет, Франция, Реймс.
<i>Степанов С. А.</i>	Международный независимый эколого-политологический университет, Москва, Россия.
<i>Стожаров А. Н.</i>	Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь.
<i>Тарутин И. Г.</i>	ГУ «РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова», Минск, Беларусь.

EDITORIAL BOARD

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

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

УДК 378.4

ФОРМИРОВАНИЕ КОГНИТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОЗНАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЗАЩИТЫ ЯЗЫКОВОГО ПРОЕКТА

Ю. И. БУТКЕВИЧ¹⁾

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

В исследовании выявляются и обосновываются механизмы формирования экологического сознания через компонентный анализ данного концепта. Экологическое образование как структурированное обучение, направленное на углубление понимания людьми экологических проблем, биоразнообразия и особенностей экологических систем, является практическим инструментом формирования экологического сознания. Оно реализуется через образовательные программы, которые несут информацию о влиянии человеческой деятельности на окружающую среду, информируют о стратегиях устойчивого управления и сохранения качества окружающей среды. Важную роль играет также психолого-педагогическое просвещение, целью которого является формирование мышления, способствующего бережному отношению к окружающей среде. Методы экологического просвещения, стимулирующие и расширяющие экологические знания и ценности, – это интерактивные семинары, дискуссии, а также другие общественные мероприятия, которые побуждают широкую публику задуматься о своих отношениях с природой. Рассматривается процесс формирования когнитивных компонентов экологического сознания с использованием методики «Защита языкового проекта». Методика языкового проекта мотивирует студентов к самостоятельному исследованию, представлению и защите своих идей, касающихся актуальных экологических проблем. Этот процесс не только улучшает лингвистические навыки обучающихся, но и способствует развитию критического мышления в отношении экологических тем.

Образец цитирования:

Буткевич ЮИ. Формирование когнитивных компонентов экологического сознания в процессе защиты языкового проекта. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2025;1:4–9.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-4-9>

For citation:

Butkevich YuI. Formation of cognitive components of environmental consciousness in the process of protecting a language project. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2025;1:4–9. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-4-9>

Автор:

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

Author:

Yuliya I. Butkevich, senior teacher at the department of linguistic disciplines and intercultural communications.
englishbutkevich@mail.ru

Студенты самостоятельно выбирают темы, связанные с изменением климата, экологической устойчивостью планеты, охраной природы. Процесс исследования и процедура защиты проекта позволяет активизировать мыслительную и речевую деятельность обучающихся, что способствует превращению идей во внутренние убеждения и, как следствие, побуждает к активным действиям в поиске решений. Обосновывается вывод о том, что включение профессионально ориентированных проектов, тематически связанных с устойчивым развитием и решением экологических проблем в процесс преподавания иностранного языка, повышает эффективность формирования когнитивных компонентов экологического сознания. Интеграция таких проектов в лингвистическое образование позволяет студентам эффективно применять экологические знания для решения практических целей с использованием иностранного языка. С одной стороны, решаются задачи активизации экологических знаний и закрепления экологических концептов, а с другой – закрепления лингвистических и речевых навыков, в том числе риторических. Такое сочетание не только способствует повышению уровня владения языком, но и воспитывает информированных, ответственных граждан, способных осознанно пропагандировать экологическую устойчивость в своих сообществах на профессиональном уровне.

Ключевые слова: экологическое сознание; экологическое образование; экологическое просвещение; когнитивные компоненты сознания; языковой проект.

FORMATION OF COGNITIVE COMPONENTS OF ENVIRONMENTAL CONSCIOUSNESS IN THE PROCESS OF PROTECTING A LANGUAGE PROJECT

Yu. I. BUTKEVICH^a

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

The article identifies and substantiates the mechanisms of forming environmental consciousness through a component analysis of this concept. Environmental education, as structured learning aimed at deepening people's understanding of environmental issues, biodiversity, and the characteristics of ecological systems, serves as a practical tool for shaping ecological consciousness. Environmental education is implemented through educational programs that convey information about the impact of human activities on the environment, inform about strategies for sustainable management and conservation of environmental quality. Psychological and pedagogical education also plays an important role, aiming to develop thinking that fosters a caring attitude toward the environment. Methods of environmental education that stimulate and expand ecological knowledge and values include interactive workshops, discussions, and other public events that encourage the general public to reflect on their relationship with nature. The article examines the process of forming cognitive components of ecological consciousness using the «Language Project Defense» methodology. This methodology motivates students to independently research, present, and defend their ideas on pressing environmental issues. This process not only enhances students' linguistic skills but also promotes the development of critical thinking on environmental topics. Students independently choose topics related to climate change, planetary sustainability, and nature conservation; the research process and project defense procedure activate students' cognitive and verbal activities, facilitating the transformation of ideas into internal beliefs and, consequently, into active efforts to seek solutions. The article concludes that incorporating professionally oriented projects, thematically linked to sustainable development and solving environmental problems, into foreign language teaching enhances the effectiveness of forming cognitive components of ecological consciousness. Integrating such projects into linguistic education allows students to effectively apply environmental knowledge to achieve practical goals using a foreign language. Thus, two objectives are addressed: the activation of environmental knowledge and the reinforcement of ecological concepts, on one hand, and the consolidation of linguistic and rhetorical skills, on the other. This combination not only improves language proficiency but also cultivates informed, responsible citizens capable of consciously promoting environmental sustainability in their communities at a professional level.

Keywords: environmental consciousness; environmental education; environmental literacy; cognitive components of consciousness; protection of a language project.

Введение

Сложность экологического сознания определяется его структурой, включающей рефлексивные, когнитивные, регулятивные, эмоциональные, этические и другие элементы. В современной литературе можно выделить несколько основных наиболее устойчивых концепций экологического сознания:

1. Поведенческая концепция экологического сознания, рассматривающая это понятие как личностное отношение, совокупность действий и поступков индивидов и групп людей, а также их поведенческие установки и ценности, благоприятные для окружающей среды [2].

2. Психологическая концепция, определяющая экологическое сознание как «многомерный динамический рефлексивный слой в сознании человека, в котором представлены целостные аспекты взаимодействия человека с окружающей средой и окружающим миром как представителя вида и человеческого сообщества» [1].

3. Ноосферная парадигма, отраженная во множестве работ как российских, так и зарубежных исследователей (В. И. Вернадский, Т. де Шарден, Н. Н. Моисеев, А. А. Яшин и др.), выделяет экологическое сознание как «ноосферное знание, транслирующее осознанность и осмысленность деятельности человека в системе сосуществования со Вселенной. На этом уровне экологическое сознание характеризуется целостностью и осмыслением глобальных проблем выживания человечества» [1].

4. «Педагогическая концепция», рассматривающая экологизацию всех уровней образования с целью формирования устойчивой экологической культуры на всех возрастных этапах личностного и профессионального развития человека и общества.

Материалы и методы исследования

Обобщение теоретических данных вышеназванных концепций позволяет выделить ряд фундаментальных компонентов экологического сознания: природа сознания, свойства сознания, функции сознания, когнитивность сознания, эмоциональность или аффективность сознания и поведенческие структуры.

Природа экологического сознания в данном случае рассматривается вне жесткой корреляции с естественнонаучным подходом, но делается акцент на совокупности взаимодействий на уровнях человек (человек и общество) – окружающий мир (живая и неживая природа), порождая потребность в ментальном сознании (индивидуальном и групповом) в отношении охраны и безопасности окружающей среды.

В этом контексте экологическое сознание определяет «способность субъекта выйти за пределы своего собственного существования» [1], осознавая свое отношение к окружающему миру и личную ответственность, то есть включает в себя рефлексивность, осознанность, благоразумие и упорядоченность.

Многообразие функций экологического сознания представлено такими компонентами, как регулятивность, оценка, креативность, целеполагание и планирование, предвидение, иррациональность и т. д.

Экологическое сознание рассматривается как многокомпонентный феномен, включающий когнитивные и деятельностные компоненты. Когнитивные компоненты включают в себя экологическое мышление, экологическую память, экологическое внимание и экологическую волю. К деятельностным мы отнесем восприятие окружающей среды и оценку воздействия на окружающую среду. Охарактеризуем каждый из когнитивных компонентов экологического сознания.

Для обоснования определения экологического мышления выясним значение понятия «мышление» – психический процесс познания внешнего и внутреннего мира, установление причинно-следственных отношений, познание информации и моделирование отношений между объектами. Соответственно, экологическое мышление – это когнитивные процессы анализа, синтеза и оценки экологической информации, концепций и проблем, навыки критического мышления в отношении к экологическим вопросам. Оно предполагает поиск эффективных решений и компромиссов, глубокое понимание и осознание экологических процессов и проблем.

Человеческая память – это удивительная способность людей запоминать, структурировать, накапливать и в нужный момент времени выдавать соответствующие знания. Все, чего достиг род *homo sapiens* за свою просматриваемую историю, базируется на уникальном умении сохранять и воспроизводить информацию о своем прошлом опыте. Таким образом, термин «экологическая память» – часть массива данных, относящихся к взаимодействию с окружающей средой.

Дар концентрировать процесс мозговой активности на той или иной деятельности называется «вниманием». В современном мире пылкий человеческий ум не испытывает недостатка в информации – для фокусировки внимания на экологической повестке, техногенном воздействии людей на планету, способах к рекреации подвергшихся негативному воздействию природных объектов, вовсе не обязательно требуется обладать профильным образованием – достаточно проявлять искреннюю вовлеченность в указанную проблематику и своим личным примером формировать у неравнодушных людей чувство персональной ответственности за происходящее в окружающей среде.

Понятие «воля» является одним из краеугольных камней таких наук, как философия и психология, определяет способность человека к моральному выбору. Люди в достаточно высокой степени могут управлять своими действиями, направляя их на достижение тех или иных целей. Всемерная поддержка сохранения экологического баланса, рачительное отношение к природным ресурсам, социальная агитация в пользу обоснованного природопользования – элементы экологического сознания, или же экологической воли.

Каким образом элементы экологического сознания влияют на окружающую среду и каковы критерии оценки этого воздействия? Очевидно, формирование ценности исходного великолетия окружающего

мира, разнообразия природных ландшафтов, сменяемости атмосферных явлений, красоты водных ресурсов, связанного с экологией сохранения человеческого здоровья, – высшая цель воспитания экологического сознания. Предлагаемая цель самым непосредственным образом влияет на последующие активности людей с высокой экологической ответственностью.

Объективными критериями оценки воздействия на окружающую среду вполне могут служить воспроизводимые и фиксируемые с помощью специализированной аппаратуры факторы. Определение уровня загрязнения почвы, воздушной и водной среды антропогенными факторами уже давно не вызывает затруднений у соответствующих служб. Широкое оповещение населения об ухудшении или же об улучшении экологической обстановки в местности проживания посредством новостных источников в значительной степени мотивирует людей минимизировать ущерб, наносимый окружающей среде, поддерживать инициативы о сортировке бытовых отходов и их максимально полной переработке, высаживать саженцы деревьев в парках и на местах лесозаготовок, принимать участие в иницилируемых местными органами власти прочих экологических мероприятиях.

Для более детального рассмотрения декомпозируем весь комплекс экологического сознания на составляющие:

- познавательный вектор;
- эмоциональное восприятие;
- поведенческий паттерн.

Познавательный, или когнитивный элемент подразумевает ментальное осознание природного и социального окружения; эмоциональный отображает сенсорно-эмоциональное восприятие окружающего мира; поведенческий, или волевой транслирует стратегии саморегуляции и адаптации в среде через взаимодействие и самовыражение.

Вышесказанное приводит к выводу, что экологическое сознание, рассматриваемое в разных областях и контекстах научной мысли, может быть интерпретировано как экологическое поведение, экологическая осведомленность, экологическая озабоченность и т. д., но основной пласт этих интерпретаций заключает в себе единое утверждение о личной и групповой осведомленности об экологических вопросах и проблемах [3].

Типология экологического сознания обычно основывается на взаимодействии четырех базовых компонентов: экологических знаний и опыта, взаимодействие в системе «субъект – объект», определение целей как направления деятельности, а также отношение к себе, миру и другим людям [5].

Экологическое сознание реализуется в форме индивидуального или коллективного сознания. Реальное проявление данных форм включает в себя совокупность антропоцентрического, экоцентрического, синергетического элементов и зависит от ситуации, социальных условий, экологических рисков и иных факторов.

В процессе формирования экологического сознания основным стимулирующим фактором является уровень экологической культуры, характерный как для отдельного человеческого сообщества, так и для населения в планетарном масштабе. При этом существуют определенные противоречия между высоким уровнем теоретизации и разработкой применимых методологических подходов к развитию экологического сознания, которые обеспечили бы наиболее эффективный переход от ассимиляции экологических знаний к их практическому использованию. Данные подходы способны обеспечить формирование таких компонентов экологического сознания, как экологические знания, экологические установки, экологические ценности, экологические намерения, экологически безопасные поведенческие стратегии и т. д. Все эти элементы играют основополагающую роль в формировании экологической культуры.

Основным механизмом формирования экологической культуры является образование и просвещение. Педагогический характер моделирования экологического мировоззрения (совокупности взглядов, убеждений и ценностей) влияет на развитие экологической ответственности у населения на уровне индивида, коллектива и человечества в глобальном масштабе. На этом этапе необходимо задействовать все виды образовательных структур и уровней для развития экологического интеллекта. Интеллектуальный аспект включает в себя совокупность экологических знаний и навыков, которые связаны с процессом формирования мировоззрения. В этот компонент входят методы поиска причинно-следственных связей между определенными явлениями и процессами в окружающем мире. Открытые образовательные тренинги, семинары и другие элементы экологической пропаганды можно отнести к образовательным механизмам.

Обучающие мероприятия, помимо закрепления экологического сознания на подсознательном уровне, формируют стойкую уверенность человека в личной ответственности не только в части предотвращения экологических катастроф, но и за загрязнение окружающей среды на бытовом уровне.

Внутренние стремления бережно относиться к природе и есть финализация сформировавшихся благодаря экологическому сознанию систем ценностей, мировоззрения, идеалов и побуждающих мотивов к деятельности по защите, сохранению и преумножению красоты земной природы.

Рассчитывать на то, что экологические поведенческие привычки станут нормой для всех и каждого само собой, не приходится. Необходимо приложить сил, в том числе и в виде профильного образования. В части преподавания иностранных языков будет более чем уместно использование обучающих материалов, соответствующих «зеленой повестке» – экологическая лексика практически не имеет уникального специализированного сленга, а соответствующий словарный запас вполне применим на практически любые темы.

Английский язык уже давно стал универсальным средством общения между народами. В сети Интернет регулярно публикуются эссе по итогам научных исследований и международных экологических конференций. В открытом доступе на английском языке имеется масса интересного материала касательно вопросов изменения климата, таяния ледников, утраты биологического разнообразия, загрязнения морей и океанов. Доступ к подобной информации на английском языке позволяет людям держать руку на пульсе глобальных экологических проблем, а также узнавать о потенциальных способах их решений.

Как уже отмечалось, использование в процессе обучения экологического глоссария, коррелирующего с наиболее употребительными универсальными выражениями, всемерно способствует изучению английского языка. Прикладной характер экологических тем, которые в конечном итоге через безопасность жизнедеятельности и сохранения здоровья затрагивают каждого, обеспечивает более легкое закрепление грамматических структур и форм.

Применение английского языка в рамках совместных международных исследовательских инициатив расширяют возможности профильных специалистов в части обмена мнениями и донесения до представителей сопредельных стран основных положений государственной экологической политики Республики Беларусь.

Уверенное владение иностранным языком повышает авторитет докладчика, вес его аргументов во время тематических дискуссий. Свободное владение английским позволяет оценить качество доводов других участников конференций: у докладчика – когда он готовит материал, выступает с ним, отвечает на вопросы и возможные замечания, у остальных – во время прослушивания и высказывания своих замечаний.

При знакомстве с англоязычной литературой, просмотре фильмов и при проведении дискуссий в разных культурных контекстах происходит культурный обмен и межкультурная коммуникация, что позволяет обучающимся изучать различные точки зрения на экологические проблемы, получать представление об альтернативных подходах к сохранению окружающей среды, рассматривать традиционные экологические знания и взгляды коренных народов на природу.

Рассматривая экологические проблемы в мире и в Республике Беларусь, сравнивая опыт рационального природопользования международными и республиканскими организациями с использованием английского языка в обучении, студенты развивают чувство гражданственности и ответственности за сохранение окружающей среды, сочувствие к сообществам, пострадавшим от деградации окружающей среды, солидаризируются с глобальными усилиями по сохранению и улучшению окружающей среды и устойчивого развития.

Владение английским языком дает возможность обучающимся отстаивать свои экологические интересы, участвовать в экологических движениях и вовлекаться в процессы формирования экологической политики на местном, национальном и международном уровнях. Социальные сети, онлайн-платформы и международная сеть Интернет дают возможность делиться своими историями, активировать поддержку экологических действий и находить сторонников их экологических взглядов.

Технологии обучения английскому языку предлагают ряд инструментов для стимулирования интереса обучающихся к познанию мира, экологических проблем и осмыслению своего отношения к окружающей среде. Не менее важное значение имеет эмоциональная поддержка в лице преподавателя, которая способствует формированию у них положительной самооценки и уверенности в решении экологических проблем [6].

Участие студентов в экологической деятельности в виде разработки и реализации языковых проектов, направленных на решение и предупреждение экологических проблем, способствует успешному формированию экологического сознания. Проектное обучение представляет собой личностно-ориентированную технологию. Слово «проект» происходит от латинского слова «projectus», что означает «брошенный вперед, выступающий, выдающийся вперед». Подготовка проектов закладывает прочный фундамент для будущей заинтересованности в освоении знаний и закреплении навыков, полученных в ходе работы над проектом.

Ориентация проектного обучения на личностное развитие объясняется тем, что в ходе его разработки и реализации обучающийся занимает авторскую позицию, когда он может воплотить экологическое содержание своего сознания и откорректировать его. При этом педагог выступает в роли партнера, консультанта, а систематизация полученной научной информации, установление степени ее достоверности становится прерогативой обучающегося, который вместо усвоения готовых знаний и понятий выстраивает свою систему, материализует свое экологическое сознание и представление о мире. Являясь одной из инновационных технологий, проектный метод помогает развивать когнитивные навыки студентов, способность самостоятельно мыслить, проявлять творческий подход и инициативу, ставить проблему и находить ее решения, ориентироваться в информационном пространстве и уметь отбирать информацию,

которая является достоверной, репрезентативной и актуальной. У студентов появляется способность обрабатывать и анализировать медиаконтент, прогнозировать и оценивать результаты своей работы. Одно из преимуществ проектного метода перед другими образовательными технологиями заключается в том, что оно способствует развитию самостоятельной деятельности студентов, индивидуально или в группах, аналитических и творческих навыков, а также ориентирует их на дальнейшую исследовательскую работу.

Одна из форм проектного обучения, которая предлагается студентам, – защита языкового проекта по темам курсовых работ или научных интересов. На подготовительном этапе студенты обсуждают возможные сферы реализации своего проектного исследования, определяют его цели и задачи. На втором этапе (исполнительском) студенты изучают опыт исследований подобного рода, планируют свою работу, собирают и анализируют материал, проводят исследования. Третий этап – это защита языкового проекта на английском языке, которая проходит в форме демонстрации презентации и сопровождается дискуссией. Проект может быть представлен как в виде презентации PowerPoint в аудитории, так и в форме страницы в социальных сетях. Публикация проекта в интернете может привлечь более широкую аудиторию для дискуссии, обеспечив обратную связь. Заключительный этап – рефлексивный. На этом этапе проект оценивается преподавателем, а участники делятся своими впечатлениями о проделанной работе, обсуждают роль и вклад в него каждого из них.

Заключение

Таким образом, участие в защите языковых профессионально значимых проектов позволяет поэтапно, последовательно, целенаправленно повышать уровень экологической культуры студентов и параллельно развивать коммуникативную компетенцию. Проектная деятельность дает возможность обучающимся максимально раскрыть свой творческий потенциал, повышает интеллектуальный уровень, способствует развитию познавательного интереса и мотивации к новым открытиям, важным и полезным как для отдельного человека, так для общества в целом. Участие в языковых проектах повышает эффективность формирования ответственного отношения к окружающей среде на основе экологического сознания, мотивирует обучающихся к занятию научно-исследовательской деятельностью в сфере экологии, повышает уровень экологической культуры и формирует активную жизненную позицию в направлении защиты и охраны окружающей среды.

Библиографические ссылки

1. Шмелева ИА. Системное психологическое описание экологического сознания в контексте глобальных экологических проблем. *Психологический журнал*. 2011;32(5):5–15.
2. Jiménez-Sánchez, Manuel & Lafuente Regina. Defining and measuring environmental consciousness. *Revista Internacional de Sociologia*. 2010;6:68.
3. Панов ВИ, Мдивани МО, Кодесс ПБ, Лидская ЭВ, Хисамбеев ШР. Экологическое сознание: теория, методология, диагностика. *Психологическая диагностика*. 2012;1:126.
4. Соболева ЕВ, Караваев НЛ. Анализ программных сервисов и платформ, обладающих потенциалом для геймификации обучения. *Научно-методический электронный журнал «Концепт»*. 2017;8:14–25.
5. Медведев ВИ, Алдашева АА. Экологическое сознание. Учебное пособие для вузов по педагогическому, психологическому и экологическому направлениям и специальностям. Москва: Издательско-книготорговый дом «Логос»; 2001. 374 с.
6. Хуторской АВ. Компетентностный подход в обучении. Научно-методическое пособие. Москва: Эйдос; Институт образования человека; 2013. 73 с.

References

1. Shmeleva IA. *Sistemnoe psikhologicheskoe opisaniye ekologicheskogo soznaniya v kontekste global'nykh ekologicheskikh problem* [Systemic psychological description of ecological consciousness in the context of global environmental problems]. *Psychological Journal*. 2011;32(5):5–15. Russian.
2. Jiménez-Sánchez, Manuel & Lafuente Regina. Defining and measuring environmental consciousness. *Revista Internacional de Sociologia*. 2010;6:68.
3. Panov VI, Mdivani MO, Kodess PB, Lidskaya EV, Khisambeeov ShR. *Ekologicheskoye soznaniye: teoriya, metodologiya, diagnostika* [Ecological consciousness: theory, methodology, diagnostics]. *Psychological diagnostics*. 2012;1:126. Russian.
4. Soboleva EV, Karavaev NL. *Analiz programnykh servisov i platform, obladayushchikh potentsialom dlya geimifikatsii obucheniya* [Analysis of software services and platforms with the potential for gamification of learning]. *Scientific and methodological electronic journal «Concept»*. 2017;8:14–25. Russian.
5. Medvedev VI, Aldasheva AA. *Ekologicheskoye soznaniye: Uchebnoye posobie dlya vuzov po pedagogicheskoyu, psikhologicheskoyu i ekologicheskoyu napravleniyam i spetsial'nostyam* [Ecological consciousness. Textbook for universities in pedagogical, psychological and ecological directions and specialties]. Moscow: Izdatelsko-knigotorgovyy dom «Logos»; 2001. 374 p. Russian.
6. Khutorskoi AV. *Kompetentnostnyi podkhod v obuchenii. Nauchno-metodicheskoye posobie* [Competence approach in teaching] Moscow: Eidos; Institute of Human Education; 2013. 73 p. Russian.

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК: 574.5:595.3

ФОРМИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННОГО АРЕАЛА ВОСТОЧНОЙ РЕЧНОЙ КРЕВЕТКИ *MACROBRACHIUM NIPPONENSE* (DE HAAN)

В. Ф. КУЛЕШ¹⁾

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

Установлено в историческом аспекте формирование современного ареала чужеродного субтропического вида восточной речной креветки (*Macrobrachium nipponense*) в новых местообитаниях Азии, Европы и Северной Америки. Показаны векторы для целенаправленной акклиматизации этого вида в водоемах-охладителях теплоэлектростанций Беларуси, Молдовы, Российской Федерации, а также в водоемах бассейна Волги (в нижнем течении). Креветки успешно акклиматизировались в новых местообитаниях. Эти места локализации явились центрами дальнейшего расселения *M. nipponense*. Последовательно, начиная с 1960-х гг., приводятся данные по случайному вселению креветок вместе с балластными водами судов, а также с промысловыми видами рыб из водоемов-доноров исторического ареала. Прежде всего, это растительноядные виды: белый амур (*Stenopharyngodon idella*), белый толстолобик (*Aristichthys nobilis*) и пестрый толстолобик (*Hypophthalmichthys molitrix*), которых перевозили с целью ведения прудовой аквакультуры либо для увеличения рыбопродуктивности местных естественных водоемов. Рассматриваются случаи самостоятельного проникновения креветок по каналам и рекам в водные экосистемы Европы и Азии. Особенно интенсивная экспансия восточной речной креветки наблюдается с начала XXI в. в водоемы бассейна Днепра (Украина), Днестра (Молдова), Дуная (Румыния), а также Терека и Дона (Российская Федерация).

Образец цитирования:

Кулеш ВФ. Формирование современного ареала восточной речной креветки *Macrobrachium nipponense* (De Haan). *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;1:10–23.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-10-23>

For citation:

Kulesh VF. Formation of the modern areas of the eastern river prawn *Macrobrachium nipponense* (De Haan). *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;1:10–23. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-10-23>

Автор:

Виктор Федорович Кулеш – доктор биологических наук, доцент; профессор кафедры биологии и методики преподавания биологии факультета естествознания.

Author:

Victor F. Kulesh, doctor of science (biology), docent; professor at the department of biology and biology teaching methods, faculty of natural sciences.
victor_kulesh@tut.by

Благодаря широкой экологической пластичности, потеплению климата экспансия этого эврибионтного вида будет продолжаться в хорошо прогреваемые эстуарные, пресноводные и солоноватые водоемы бассейна Каспийского и Черного морей.

Ключевые слова: восточная речная креветка; местообитание; акклиматизация; распространение; водные экосистемы; водоем-охладитель.

Благодарность. Автор выражает благодарность за предоставленные отписки своих статей доктору Виктору Суругу (университет им. Александра Гуза, г. Яссы, Румыния), доктору сельскохозяйственных наук, профессору П. В. Шекку (Одесский государственный экологический университет, Украина); Н. А. Небесиной – заведующей сектором генетических исследований Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО»; кандидату биологических наук, доценту Ф. М. Шакировой, ведущему научному сотруднику Татарского филиала ФГБНУ «ВНИРО»; Е. И. Рачеку – кандидату биологических наук, ведущему научному сотруднику отдела планирования, организации и координации исследований в области аквакультуры Тихоокеанского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО») (Российская Федерация).

FORMATION OF THE MODERN AREAS OF THE EASTERN RIVER PRAWN, *MACROBRACHIUM NIPPONENSE* (DE HAAN)

V. F. KULESH^a

^aBelarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank,
18 Savieckaja Street, Minsk 220030, Belarus

The formation of the modern range of the alien subtropical species of eastern river shrimp (*Macrobrachium nipponense*) in new habitats of Asia, Europe and North America has been established from a historical perspective. Vectors of targeted acclimatization of this species into cooling reservoirs of thermal power plants in Belarus, Moldova, the Russian Federation, as well as into reservoirs of the Volga basin (in the lower reaches) are shown. The shrimp successfully acclimatized to new habitats. These localization sites became centers of further settlement of *M. nipponense*. Consistently, starting from the 60s of the last century, data are provided on the accidental introduction of shrimp along with the ballast waters of ships, as well as with commercial fish species from donor water bodies of the historical range. First of all, these are herbivorous species: grass carp (*Ctenopharyngodon idella*), silver carp (*Aristichthys nobilis*) and bighead carp (*Hypophthalmichthys molitrix*), which were transported for the purpose of pond aquaculture or to increase the fish productivity of local natural reservoirs. Cases of independent penetration of shrimp through canals and rivers into the aquatic ecosystems of Europe and Asia are considered. A particularly intensive expansion of the eastern river shrimp has been observed since the beginning of the 11th century in the reservoirs of the Dnieper (Ukraine), Dniester (Moldova), Danube (Romania), as well as the Terek and Don (Russian Federation). Thanks to broad ecological plasticity and climate warming, the expansion of this eurybiont species will continue into well-warmed estuarine, freshwater and brackish water bodies of the Caspian and Black Seas.

Keywords: eastern river shrimp; habitat; acclimatization; distribution; aquatic ecosystems; cooling pond.

Acknowledgments. The author considers it his duty to express gratitude for kindly provided reprints of his articles to doctor Victor Surugiu (Alexandru Ioan Cuza University, Iași, Romania); doctor of science (agriculture), professor P. V. Shek (Odessa State Ecological University, Ukraine); N. A. Nebesikhina, head of the genetic research sector of the Azov-Black Sea branch of the Federal State Budgetary Institution «VNIRO»; PhD (biology), docent F. M. Shakirova, senior researcher Tatar branch of FGBNU «VNIRO»; E. I. Rachek, PhD (biology), Leading Researcher of the Department of Planning, Organization and Coordination of Research in the Field of Aquaculture of the Pacific Branch of the Federal State Budgetary Institution «VNIRO» («ТИНРО») (Russian Federation).

Введение

Восточная речная креветка *Macrobrachium nipponense* (De Haan) широко распространена в регионах Юго-Восточной Азии, Южной Азии, включая Японию, Корею, Китай, водоемы стран полуострова Индокитай и Тайваня. На последнем *M. nipponense* встречается повсеместно, охватывая почти всю территорию. Было высказано предположение, что этот вид возник в материковом Китае, а затем распространился на Тайвань по сухопутным мостам между ним и Китаем в плейстоцене [1]. В местах естественного обитания эти креветки встречаются в солоноватой воде эстуариев, лагун (соленость до 10 ‰), вдоль морских побережий, а также в большом отдалении от моря: в озерах, водохранилищах, горных ручьях, реках с песчаным и илистым дном, обилием водной растительности, предпочитая заводи и медленно текущие воды [2–10].

На Дальнем Востоке, на территории Российской Федерации этот вид впервые был описан в озере Ханка среди трех видов пресноводных креветок в исследованиях Амурской ихтиологической экспедиции как *Palaemon superbus* [11]. Современные траловые учеты численности показали, что запасы этой креветки в озере Ханка составляют 22,4 т [12].

Восточная речная креветка – необязательный амфидромный вид. Ряд популяций остаются в эстуариях (устьях рек) для завершения своего жизненного цикла, но некоторые встречаются в прибрежных или внутренних пресноводных озерах, что является результатом переноса их среды обитания во внутренние пресноводные воды [9; 10; 12]. Известно, что *M. nipponense* демонстрирует высокую степень толерантности к абиотическим и биотическим факторам [1; 13]. Особи этого вида могут также мигрировать между пресной и солоноватой водой (амфидромный вид) и в отличие от многих видов рода *Macrobrachium* не требуют солоноватой воды для размножения. Это позволяет им процветать в таких различных внутренних водоемах, как озера, реки, водохранилища и горные ручьи, а также в эстуариях и межприбрежных районах [1; 3; 14]. В своем естественном ареале (например, в реке Янцзы и водоемах ее бассейна) жизнедеятельность восточной речной креветки проходит при температуре от 2–5 °С зимой и до 32 °С летом. Оптимальная температура – 25–28 °С [15].

Интерес к этому виду в последнее время возрос благодаря его способности к естественному размножению во всех видах пресноводных водоемов и высокой скорости роста, устойчивости к заболеваниям, более длительному вегетационному периоду (по сравнению с *M. rosenbergii*) при выращивании в пресных водах. Одно из больших достоинств – способность достигать товарной массы (5–6 см) и максимального размера тела до 9–10 см в течение одного выростного сезона. Таким образом, благодаря широкой экологической толерантности и достаточно высокой хозяйственной значимости, восточная речная креветка является одним из ключевых объектов пресноводной аквакультуры среди беспозвоночных в Японии, Китае, Вьетнаме, где производство продукции этого вида растет с каждым годом [8; 16–20]. Проведенные в Иране трофологические исследования свидетельствуют, что этот вид является ценным пищевым продуктом для человека и содержит достаточное количество белка по сравнению с другими ракообразными, низкий уровень липидов и высокий уровень n-3 и n-6 жирных кислот [21]. По данным ФАО, производство пресноводных креветок в мире составляет примерно 500 тыс. т в год. В основном это гигантская пресноводная креветка (*Macrobrachium rosenbergii*) и восточная речная креветка, хотя до недавнего времени большая часть коммерческой культуры была основана на гигантской пресноводной креветке. Тем не менее, более 250 000 т восточной речной креветки произвел Китай в 2013 г. в результате выращивания и промыслового лова [16]. На таком же стабильном уровне (около 200 тыс. т ежегодно) остается производство этого лидирующего вида пресноводных креветок в течение последнего десятилетия [16; 22].

В настоящее время появляется все больше сведений об активном продвижении этого субтропического вида пресноводных креветок по различным водным экосистемам Азии и Европы, где он является чужеродным вселенцем. В этой связи, цель данной работы – систематизация и анализ данных по истории акклиматизации восточной речной креветки в новых местообитаниях и установление современных миграционных путей.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Расселение *Macrobrachium nipponense* в XX в.

Российская Федерация. Начиная с шестидесятых годов XX в., московские аквариумисты добывали в прудах-охладителях ГРЭС им. Классона (г. Электрогорск, Московская обл.) своеобразных пресноводных креветок. Первые определения вида исходили из предположения, что он попал в Подмоскowie во время перевозок креветок из озера Ханка в Рыбинское водохранилище. В связи с этим вид был идентифицирован как *Macrobrachium asperulum* von Martens (*Palaemon superbus*) – у авторов, изучавших пресноводных креветок Дальнего Востока) [23]. Более тщательное изучение материала показало, однако, что это другой вид того же рода – *Macrobrachium nipponense* (De Naan). Для проверки идентификации вида соответствующие экземпляры были посланы крупнейшему знатоку данной группы Л. Б. Холтхейсу (Holthuis L. B., Лейден, Нидерланды), который подтвердил это определение. Удалось установить, что креветки были завезены в Подмоскowie в 1960 г. вместе с молодью растительноядных рыб из реки Янцзы [24].

Вторым новым местообитанием этого вида в Российской Федерации явилось Заинское водохранилище, куда креветок интродуцировали намеренно в 1967 г. из водоемов бассейна р. Амур в рыболовное хозяйство в качестве кормовой базы для молоди белого амура (*Ctenopharyngodon idella*) и пестрого толстолобика (*Hypophthalmichthys molitrix*), завезенных отсюда для промышленного разведения. Заинское водохранилище расположено в восточной части Республики Татарстан. Заинская ГРЭС им. 50-летия СССР ОАО «Татэнерго» – ОАО «Генерирующая кампания» мощностью 2400 МВт сооружено на реке Зай и введено в эксплуатацию в 1976 году. Для нужд технического водоснабжения Заинской ГРЭС на реке

возведен гидроузел с прудом-охладителем, поверхность охлаждения которого равна 20,45 км². Средняя температура воды в Заинском водохранилище в разные годы варьировала летом от +24° до +28 °С. Зимой вода в районе водосливной плотины и на несколько километров после нее по руслу реки не замерзает. Здесь дана количественная оценка, проведенная в 2004–2010 гг., которая показала высокую плотность популяции креветок, локально достигающей 41 экз·м⁻² [25]. Как указывает автор, данный вид должен быть тщательным образом изучен, так как не совсем ясна его роль в экосистеме Заинского водохранилища, где он сосуществует с речным раком (*Astacus astacus* L.).

Центральная Азия. В конце 1950-х гг. в озера Арнасайской системы случайно попали и прижились пресноводные креветки *Palaemon superbus* (по предварительной идентификации). Позже выяснилось, что это восточная речная креветка *Macrobrachium nipponense*, которая явилась предпочитаемым пищевым объектом для судака [26]. Появившись сначала в рыбхозе «Балыкчи» Ташкентской обл., этот вид широко распространился по равнинным водоемам Узбекистана и соседних стран, чему способствовали перевозки рыбопосадочного материала. В настоящее время восточная речная креветка встречается в пресных и солоноватоводных водоемах (реки, каналы, озера, пруды) всех областей Узбекистана. Специальный промысел креветки в стране отсутствует, собранную при облове рыбоводных прудов креветку используют главным образом как корм для домашней птицы [26]. Наиболее исследованным местообитанием этого вида стала Айдар-Арнасайской системы озер. Донная фауна этих водоемов не отличается разнообразием и в настоящее время представлена в основном креветкой *M. nipponense*, личинками хирономид, малощетинковыми червями семейства Tubificidae. Айдар-Арнасайская система озер (ААСО) является одним из крупнейших рыбохозяйственных водоемов Узбекистана (до 60 % добычи рыбы) и представляет собой комплекс бессточных озер – накопителей дренажных вод Айдаркуль, Тузкан, Восточный Арнасай и Арнасайское водохранилище, растянувшиеся на более чем 200 км. Таким образом, современные исследования подтвердили тот факт, что восточная речная креветка является доминирующим представителем макрозообентоса этой экосистемы и важнейшим компонентом пищевого спектра судака [27; 28].

В Казахстане восточная речная креветка является интродуцентом, завезенным из Дальнего Востока и Китая при акклиматизации промысловых видов рыб [29; 30]. При исследовании Капчагайского водохранилища, расположенного в Алматинской обл. (бассейн реки Или), экспедицией Института зоологии НАН Беларуси впервые для этого региона были обнаружены два вида пресноводных креветок, которые впоследствии были идентифицированы Л. Б. Холтхейсом как *Exopalaemon modestus* и *Macrobrachium nipponense* [31]. По результатам исследований, проведенных в 2014–2015 гг., ареал восточной речной креветки в Казахстане охватил Южно-Казахстанскую (р. Сырдарья, водохранилище Бадам) и Жамбылскую (оз. Биликоль, водохранилища Шорго, Тасоткель, Аксу) области [30].

В Туркменистане креветки этого вида впервые были обнаружены в районе Марыйской ГРЭС, на 404-м км Каракумского канала (сборы Ф. М. Шакировой, 1984 г.), в последующем они проникли в водохранилища Каракумского канала (устное сообщение А. А. Николаева, сборы из Куртглинского водохранилища, 1988). Отловленные креветки были определены как *Macrobrachium nipponense*. Появление этого вида рассматривается как положительный факт, поскольку новый вид явился дополнительным пищевым ресурсом для хищных видов рыб, а также диетическим продуктом питания, что в перспективе является возможным объектом прудовой аквакультуры [32].

Беларусь. Следующим этапом расселения этого вида была намеренная акклиматизация в водоемах-охладителях теплоэлектростанций. Впервые в СССР было разработано биологическое обоснование и в 1982 г. проведены целенаправленные работы по акклиматизации субтропического вида – восточной речной креветки в водоем-охладитель Березовской ГРЭС (Березовский р-н Брестской обл.) с целью обогащения кормовой базы водоема-охладителя. Последняя под воздействием сбросных подогретых вод ГРЭС деградировала, поскольку многие беспозвоночные не выдержали пресса повышенной температуры и исчезли из данного водоема [30; 31; 33]. Вселение выборки креветок в количестве 1,5 тыс. особей было произведено из водоема-охладителя ГРЭС № 3 им. Классона (Московская обл.). В конце 1980 г. этот вид из водоема-охладителя Березовской ГРЭС был вселен в водоем-охладитель Лукомльской ГРЭС (Чашниковский р-н Витебской обл.). В обоих водоемах с обедненным видовым составом биоты были сформированы высокопродуктивные популяции этого вида, которые заняли лидирующее место в бентосном населении. Уже осенью, в первый год акклиматизации в экосистеме водоема-охладителя Березовской ГРЭС численность креветок достигла 30–40 тыс. экземпляров, а в 1985 г. в теплом сбросном канале составила в среднем 1,5 экз·м⁻². Креветки с водой также попадают в земляные рыбоводные пруды тепловодного рыбного хозяйства, где к концу вегетационного сезона достигают товарных размеров [34–36]. В 2003–2007 гг., что, вероятно, связано с изменением температурного режима в водоеме-охладителе, численность популяции восточной речной креветки снижалась. В последующий период к 2014 г. численность креветок вновь увеличилась, достигая в теплых каналах 28 экз·м⁻² (самки) и 22 экз·м⁻² (самцы) [37].

Молдова. В апреле 1986 г. была осуществлена интродукция восточной речной креветки из водоема-охладителя Березовской ГРЭС в Кучурганское водохранилище-охладитель Молдавской ГРЭС площадью 2730 га и средней глубиной 3 м. Креветки перевозились самолетом в полиэтиленовых пакетах и далее автомобилем. Длительность транспортировки составила 14 часов. Всего было вселено 2 тыс. особей небольшими партиями в прибрежные зоны устьевых участков двух сбросных каналов ГРЭС с богатой водной растительностью. К концу 1987 г. численность креветок достигла почти 600 тыс. особей [38].

Российская Федерация. Согласно биологического обоснования, утвержденного Косультативным советом по вопросам акклиматизации при Ихтиологической комиссии Министерства рыбного хозяйства СССР (протокол № 106 от 12 октября 1989 г.), из водоема-охладителя Березовской ГРЭС (Беларусь) в Ильмень Ловецкий (бассейн р. Волги, Астраханская обл.) было вселено 1 тыс. особей восточной речной креветки. Они были помещены в полиэтиленовые пакеты и в течение суток перевезены самолетом по маршруту Брест-Астрахань и далее вертолетом при участии автора данной статьи. Вселение данной партии рекрутов было произведено 14 июня 1990 г.

В это же время была осуществлено вселение восточной речной креветки в водоем-охладитель Приморской ГРЭС (Лучегорское водохранилище) – крупнейшей теплоэлектростанции на Дальнем Востоке Российской Федерации, расположенной в поселке городского типа Лучегорск Приморского края. Площадь зеркала водохранилища 10,43 км². Рекруты (1120 экз.) были завезены из водоема-охладителя Березовской ГРЭС в 2 приема (1988 г. – 400 экз. половозрелых особей; 1989 г. – 720 экз. разновозрастных особей). Учетные работы осенью 1989 г. показали, что численность креветки увеличилась в 800 раз и составила 900 тыс. особей на площади, ограниченной двухметровой изобатой и урезом воды. Можно считать, что вселение восточной речной креветки в водоем-охладитель ГРЭС прошло успешно [39].

При исследованиях состояния бентофауны в Камском отроге Куйбышевского водохранилища в июне 1986 г. в районе «Граханского поворота» у устья р. Вятки было отловлено 4 экз. неполовозрелых особей пресноводной креветки *Macrobranchium* sp. В последующие годы креветки в сборах не попадались [40]. Авторы делают вывод, что это, по-видимому, случайное попадание в водоем данного вида в результате экспериментов по интродукции. К такому же выводу пришли и другие исследователи: «Ранее обнаруженная нами (1986 г.) молодь креветки *Macrobrachium* sp. в Камском отроге Куйбышевского водохранилища, по-видимому, как результат попытки ее акклиматизации при выращивании на рыбодонных заводах в дальнейшем не была зарегистрирована» [41]. Вероятнее всего это была восточная речная креветка. Надо полагать, что годовой температурный режим данного водоема не способствовал акклиматизации этого субтропического вида. К сожалению, факт обнаружения креветки *M. nipponense* в Куйбышевском водохранилище был продублирован [42] без подтверждения реальными полевыми исследованиями. Например, Р. Р. Борисов (2016) указывает, что этот вид пресноводных креветок обитает в водоемах-охладителях Курской, Смоленской и Калининской ГРЭС, а также интродуцирован в Куйбышевском водохранилище, не подтверждая это никакими данными [43].

Иран. Новые местообитания восточной речной креветки были характерны примерно до конца XX в. С 1998 г. этот вид успешно обосновался в лагуне Анзали провинция Гилян (рис.1) с самой высокой плотностью, наблюдаемой по реке Пазикнан.

Креветки начали стремительно размножаться, расселяясь фактически во всех каналах и ручьях в пределах лагуны, кроме открытых водных центральных частей, как и в многочисленных ирригационных каналах, окружающих лагуну. Плотность популяции уменьшается к устью лагуны, и вид не встречается в олигогалинных частях во входе в лагуну, ни по побережью Каспийского моря. Промеры 108 самцов и 167 самок, пойманных в реке Сиахдарвишан, показали, что самцы немного длиннее, чем самки, со средней полной длиной (от острия рострума до конца тельсона) $49,8 \pm 12,6$ мм (стандартное отклонение) и $46,4 \pm 12,2$ мм соответственно [44].

В XXI в. отмечена многочисленная устойчивая популяция креветок в этом водоеме. Исследования, проведенные на 3-х станциях, показали, что средняя масса и общая длина тела половозрелых особей составила $2,9 \pm 0,03$ г и $58,9 \pm 0,1$ мм соответственно [45]. По неопубликованным данным Исследовательского центра аквакультуры внутренних вод Иранского научно-исследовательского института рыболовства, на этих же станциях плотность популяции *M. nipponense* варьировала от 30 до 55 кг/м³ (так в авторском тексте) [46]. Очевидно, к таким данным можно относиться с недоверием, но можно предположить, что биомасса креветок в этом водоеме была очень высока. Исследования, проведенные в реке Сиахдарвишан с января по декабрь 2015 г., показали высокую численность креветок [47].

Восточная речная креветка является всеядным видом, и естественная кормовая база составляет основную часть ее рациона в водно-болотных угодьях Анзали. Пищевой спектр включал 14 компонентов, среди которых доминировали фитопланктон, моллюски и детритные формы. Таким образом, всеядное питание, по-видимому, является одной из причин успеха и выживания вида в экосистемах лагуны Анзали, повышая его толерантность к факторам среды [21].

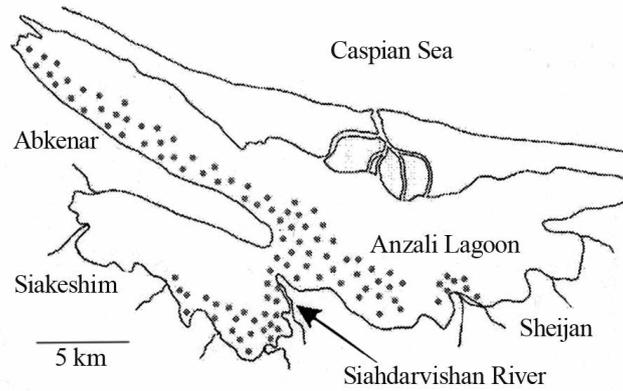


Рис. 1. Распределение восточной речной креветки в лагуне Анзали, Иран [44]

Fig 1. Distribution of eastern river shrimp in Anzali Lagoon, Iran [44]

Еще одно местообитание зарегистрировано в р. Джирдех на востоке провинции Гилян. Это регион южного побережья Каспийского моря, которое является основным местом обитания этих креветок. Образцы были собраны с апреля 2012 г. по сентябрь 2012 года. Общая длина и масса тела *M. nipponense* варьировали в пределах 1,6–8,8 см и 0,4–6,3 г соответственно [48]. Как отмечают авторы, успешная адаптация этих креветок в различных водоемах данного региона заключается в относительно легком воспроизводстве. Несмотря на то что этот вид важен для аквакультуры и его внедрение в местные водоемы можно считать положительным, его интродукция усилила конкуренцию за пространство и пищу с нативными видами, в основном пресноводными десятиногими раками.

В июне 2005 г. был проведен отбор проб водной среды из озера Алагол, расположенного в 75 км к северо-западу от города Гонбад провинция Голестан (Иран), где отловлено 24 экз. *Macrobrachium nipponense* (самцы, неядущие самки и яйценозные самки). Десять особей собрано из пруда Дастгейб, который находится в 25 км к северу от города Агхала [49].

Нет достоверных сведений о том, каким образом этот вид попал в Иран. Наиболее вероятным путем является непреднамеренная интродукция вместе с различными видами рыб [49]. Личинки и молодь нескольких видов рыбы, включая белый амур, пестрый толстолобик, белый толстолобик (*Aristichthys nobilis*) и карп (*Cyprinus carpio*), периодически импортируются из Китая и Узбекистана и, возможно, личинки *M. nipponense* были перевезены таким способом. Подтверждением этой гипотезы является то, что некоторые из водоемов в провинции Голестан располагались рядом с прудами, в которых креветки были обнаружены наряду с белым амуром и пестрым толстолобиком, которых импортированы из Китая [44].

Ирак. В 2006 г. появились сведения о появлении восточной речной креветки в Ираке [50]. Это в основном болотистая местность на юге: Аль-Хаммарские болота, болота Аль-Хувейза, Аль-Чибайские болота, болото Абу-Зириг и река Гармат-Али (рис. 2).

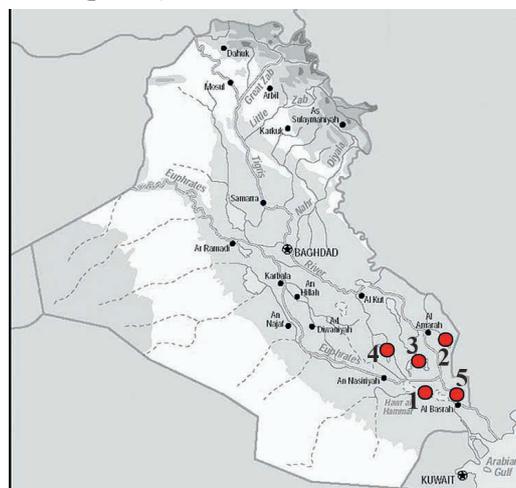


Рис. 2. Локализация восточной речной креветки в Ираке [50]: 1) Аль-Хаммарские болота, 2) болота Аль-Хувейза, 3) Аль-Чибайские болота, 4) болото Абу-Зириг, 5) р. Гармат-Али

Fig. 2. Localization of eastern river shrimp in Iraq [50]: 1) Al-Hammar Marshes, 2) Al-Huwaizah Marshes, 3) Al-Chibayish Marshes, 4) Abu-Zirig Marsh, 5) Garmat-Ali River

Хотя нет данных о *M. nipponense* из других частей Ирана (кроме регионов, прилегающих к югу и юго-востоку от Каспийского моря), то весьма возможно, что креветки, обнаруженные в Ираке, мигрировали из рыбоводных прудов Ирана и рассеялись по южному Ираку через болота Аль-Хувейза или р. Гармат-Али [50].

Сингапур и Филиппины. В конце XX в. восточная речная креветка была интродуцирована в Сингапур и Филиппины. Теперь она обычна в многочисленных ручьях и других водотоках, особенно в менее кислых водах Сингапура [51]. Есть предположение, что попала она сюда случайно с декоративными серебряным карасем и карпом или из Китая, или из Японии первоначально в сельские рыбные пруды, от которых и произошло дальнейшее расселение. Детальные пути проникновения в водные экосистемы Филиппин неизвестны, но можно предположить, что эти популяции сформировались или случайно от аквакультуральных прудов, бассейнов (производственная, декоративная аквакультура), или преднамеренно введены в дикие водоемы [5; 44].

2. Расселение *Macrobrachium nipponense* в XXI в.

Приведенные данные показывают картину распространения восточной речной креветки до начала XXI в. В результате акклиматизационных работ, проведенных с помощью Института зоологии НАН Беларуси в 1986, в 1990-е гг. на территории Европейской части бывшего Советского Союза образовались 2 центра расселения восточной речной креветки. Это бассейн нижнего течения р. Днестр и бассейн нижнего течения р. Волги, откуда началась вторая волна экспансии этого вида по близлежащим водным экосистемам (рис. 3) [53].

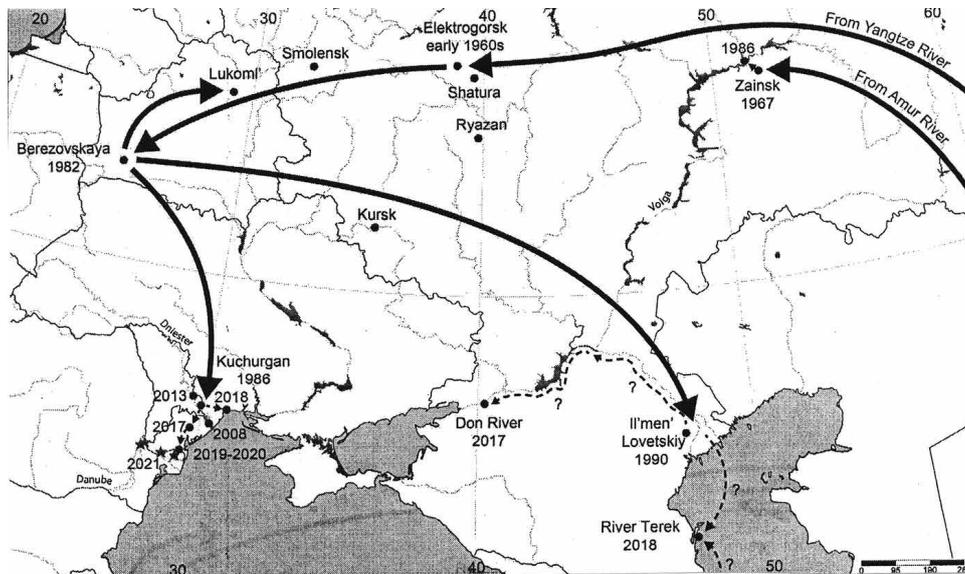


Рис. 3. Акклиматизация восточной речной креветки [53]

Fig. 3. Acclimatization of eastern river shrimp [53]

США. В начале XXI в. восточная речная креветка была обнаружена на восточном побережье США в Северной и Южной Каролине, в районе полуострова Флорида. Хотя точный вектор интродукции неясен, количество случаев обнаружения в непосредственной близости от морских портов заставило биологов предположить, что появление креветок в США произошло в результате сброса балластных вод (Smith S. North Carolina Division of Marine Fisheries, личное сообщение; Kingsley-Smith P. South Carolina Department of Natural Resources, личное сообщение). В Северной Каролине образцы собирались каждый год в период 2014–2019 гг. в водоемах бассейна р. Уайт-Оук [52].

Молдова, Украина. В первом центре расселения в бассейне Днестра 2008–2016 гг. было выявлено очередное расширение ареала восточной речной креветки. Вероятно, из-за потепления климата этот вид проник в реку Турунчук, а затем распространился по Днестру вплоть до Тирасполя [54].

Начиная с 2008 г., креветки были обнаружены в дельте Днестра и близлежащих прудах [55; 56], а также и в рыбоводных прудах на территории в украинской части дельты Днестра [57; 58], что стало ключевым событием для их дальнейшего расселения по водным артериям. Эти пруды связаны с крупнейшими местными рыбоводными хозяйствами, где разводят рыбу для последующего зарыбления других прудов в бассейнах Нижнего Днестра, Нижнего Дуная и соседних малых рек. Находки этого вида в бассейнах малых рек в 2018–2020 гг. объясняются этим вектором. Кроме того, с 2017 г. пресноводные креветки наблюдались в водоемах вблизи г. Сарата Одесской обл. Таким образом, в нижнем течении Днестра и его

устье *M. nipponense* уже хорошо прижился и на местном уровне, стал многочисленным компонентом донной фауны, достигая плотности до 17 экз·м⁻² в Днестровском лимане и 11 экз·м⁻² в Кучурганском лимне. В 2018 и 2020 гг. креветка проникла в некоторые водоемы бассейна небольших рек, впадающих непосредственно в Черное море [58].

За пределами бассейна Днестра креветки были обнаружены в бассейне небольшой реки Аккаржанка, которая впадает в лиман Сухий Лиман. Несколько особей этого вида были отобраны 23 июля 2018 г. Позже, в августе 2018 г., была оценена их плотность до 15 экз·м⁻². Во всех пробах присутствовали молодые особи. Было обследовано еще пять прудов бассейна Сухий Лиман, а 2 сентября 2018 г. креветка была обнаружена в Александровском водохранилище с плотностью 3–4 экз·м⁻² (половозрелые особи, включая самок с яйцами) и 13 марта 2020 г. один экземпляр был зарегистрирован в водохранилище бассейна Большого Аджалыкского лимана [59]. Это местонахождение и Александровское водохранилище представляют собой редкий тип местообитания – верхний эстуарий, отделенный от его остальной части плотинами и превращенный в пресноводный водоем, который все еще сильно минерализован [57; 59].

В течение 2019–2020 гг. креветка *M. nipponense* стала обычным элементом бентосной фауны Килийского рукава р. Дунай. Это подтверждается регулярными регистрациями многочисленных скоплений креветок в разных частях рукава (от 32 до 80 км основного течения) с лета 2019 г. (рис. 4). Вполне вероятно, что аномально теплая зима 2019–2020 гг. также была благоприятной для распространения и размножения этого чужеродного вида [60].



Рис. 4. Локализация восточной речной креветки в украинской части дельты Дуная: 1) водоем «Лиски-1», 32 км от устья Дуная, 2) рисовая система возле деревни Лиски, 25 км от устья Дуная, 3) Килийский рукав, Соломоново ответвление, 31 км от устья Дуная, 4) Базарчукский залив, 18 км от устья Дуная, 5) Килийский рукав, 32 от устья Дуная, 6) Килийский рукав, 80 от устья Дуная [60]

Fig. 4. Localization of the eastern river shrimp in the Ukrainian part of the Danube delta: 1) reservoir «Liski-1», 32 km from the mouth of the Danube, 2) rice system near the village of Liski, 25 km from the mouth of the Danube, 3) Kiliya branch, Solomon branch, 31 km from mouth of the Danube, 4) Bazarchuk Bay, 18 km from the mouth of the Danube, 5) Kiliya branch, 32 from the mouth of the Danube, 6) Kiliya branch, 80 from the mouth of the Danube [60]

В настоящее время восточная речная креветка практически повсеместно присутствует в нижнем течении бассейнов Дуная и Днестра, в Дунайско-Днестровском междуречье и водоемах к востоку от Днестра. Успешная адаптация и благоприятные климатические условия последних лет обеспечили значительный рост популяций этого вида. В бассейнах этих рек отмечены более высокие значения максимальной длины тела креветок (самцы – 115 мм, самки – 87 мм). Подтверждается рост численности популяции по сравнению с предыдущими годами [59–61]. В итоге в 2018–2020 гг. восточная речная креветка была зарегистрирована в различных типах местообитаний в трех областях Украины, представляющих различные климатические и экологические условия страны.

Румыния. Наиболее вероятным направлением его интродукции в бассейн р. Дунай является преднамеренное или случайное попадание из бассейна Днестра на рыболовные фермы близ города Сарата [60]. Этот вид, вероятно, достиг лимана Сасык через р. Сарата и по каналу, соединяющему Сасык с Дунаем, проник в рукав Килия. Теперь она распространяется дальше вверх по течению и, как сообщается, доходит до Галаца. Более того, в июле 2022 г. многочисленные особи, включая яйцекладущих самок и молодь, были пойманы рыбаками в озерах между Килийским и Сулинским рукавами дельты Дуная, куда они, скорее всего, прибыли через канал Стипок-Пардина [53].

Российская Федерация. Во втором центре расселения (дельта р. Волга) расширение ареала этого вида было зарегистрировано в октябре 2017 г. при отборе гидробиологических проб в нижнем течении р. Терек (24 км выше устья) (рис. 5). Было поймано 4 половозрелых особи и несколько экземпляров молоди восточной речной креветки ранее неизвестных для этого региона. В мае и октябре 2018 г. креветки, в том числе молодь, были найдены ниже по течению р. Терек в нескольких точках. Общая длина тела пойманных экземпляров составила 36,2–51,7 мм [62].

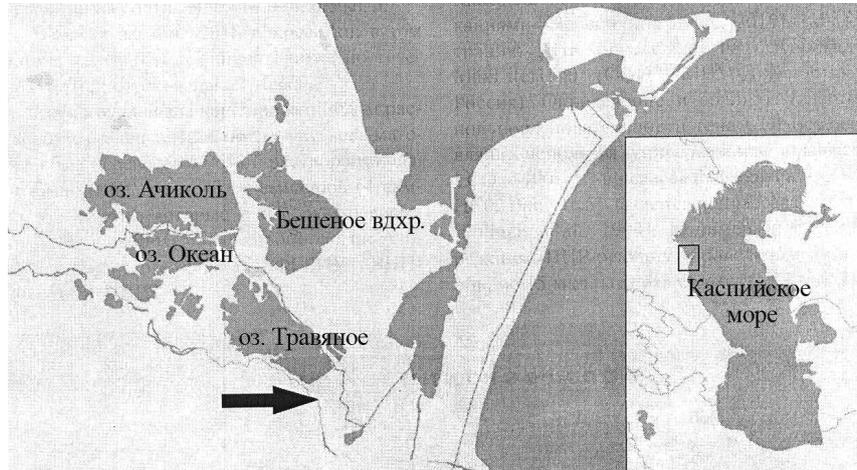


Рис. 5. Карта-схема места первого обнаружения восточной речной креветки в р. Терек [62]

Fig. 5. Schematic map of the site of the first discovery of the eastern river shrimp in the Terek River [62]

Неоднократные находки взрослых особей *M. nipponense* и появление ее молоди в устье р. Терек позволяют предполагать существование здесь сформированной и достаточно многочисленной популяции. Возможно, что эта креветка обитает во всех многочисленных водоемах системы устья р. Терек. Вероятнее всего источником терских популяций служат креветки из водоемов бассейна р. Волга. Ими могут быть как креветки верхнего течения реки, так и выпущенные в 1990 г. в ильмень Ловецкий Астраханской обл. В пользу этой версии говорит то, что расстояние вдоль берега моря от западных рукавов р. Волги до устья р. Терек всего около 250 км. Район нового обнаружения находится под влиянием волжского стока, а соленость северной части моря составляет около 10 ‰, течения в районе устья р. Терек направлены с севера на юг, то есть совпадают с направлением расселения. Высказанная точка зрения подтверждается сравнением нуклеотидной последовательности гена COI терских креветок и креветок, обитающих в лагуне Анзали (Иран, юго-запад Каспийского моря; данные, размещенные в GenBank). Из кладограммы, приведенной в данной статье, следует, что образцы японской креветки, натурализовавшейся в водоемах и водотоках Ирана и России, входят в разные субклады [62]. Следовательно, креветки лагун южного Каспия не могут быть источниками терской популяции. Возможно, этот вид уже распространена в водоемах Нижней Волги и, скорее всего, обитает в водоемах бассейна р. Кума, находящегося между устьями р. Волга и р. Терек, в скором времени может стать обычным видом для хорошо прогреваемых эстуарных и пресноводных экосистем бассейна Каспийского моря [62].

В сентябре 2019 г. два экземпляра восточной речной креветки были найдены в р. Дон у безымянного острова вблизи села Арпачин. Наиболее крупный из найденных экземпляров (самец) имел следующие размеры: общая длина тела – 52,2 мм, промысловая длина – 41,5 мм. Для второго экземпляра (самки) аналогичные параметры составили: 38,3 и 30,9 мм соответственно [63].

В октябре 2020 г. в дельте р. Дон в канале Мокрая Каланча были пойманы 2 экземпляра креветок, которые были идентифицированы как самки *M. nipponense*. Самая крупная креветка имела общую длину тела 55,5 мм, массу – 1,705 г. Второй экземпляр имел сходные параметры – 48,9 мм и 1,084 г соответственно. Генетический анализ показал, что креветки *M. nipponense* из р. Дон относится к той же кладе, что и образцы из Ирана, Ирака и Юго-Восточного Китая [63].

Таким образом, повторное обнаружение *M. nipponense* в районе Нижнего Дона через год после первой регистрации, а также наличие самок с яйцами на плеоподах, позволяют предположить формирование еще одной популяции захватчика в более неблагоприятных климатических условиях, чем те, которые предположительно подходящие для этого теплолюбивого вида. В нижнем течении р. Дон этот теплолюбивый вид-инвайдер находит оптимальные условия для своего развития, главным образом в зонах термальных вод, которые он использует в качестве рефугиума. Ближайшим водоемом такого рода является термальный канал Новочеркасской гидроэлектростанции (ГЭС) [63].

Заключение

Таким образом, можно предположить, что благодаря широкой экологической пластичности экспансия этого эврибионтного вида будет продолжаться, он успешно встроится в бентосное сообщество и натурализуется в хорошо прогреваемых эстуарных и пресноводных, а также солоноватоводных водоемах бассейна Каспийского и Черного морей. Этому процессу, несомненно, будет способствовать и потепление климата, что скажется в перестройке биоты водных экосистем в пользу теплолюбивых видов. Восточная речная креветка является промысловым видом и с этой точки зрения появление ее в новых местообитаниях можно считать положительным явлением. Остается открытым вопрос о конкурентных отношениях с речными раками и, в частности, с длиннопалым раком *Pontastacus leptodactylus* (Esch.). Тем не менее, можно предположить, что восточная речная креветка вместе с другими чужеродными ракообразными усилит конкурентное давление на местные виды десятиногих ракообразных рака, что окажет влияние и на всю бентосную фауну.

Библиографические ссылки

1. Chen RT, Tsai CF, Tzeng WN. Freshwater prawns (*Macrobrachium* Bate, 1868) of Taiwan with special references to their biogeographical origins and dispersion routes. *Journal of Crustacean Biology*. 2009;29(2):232–244.
2. Ahmed N, Demaine H, Muir JF. Freshwater prawn farming in Bangladesh: history, present status and future prospects. *Aquaculture Research*. 2008;39(8):806–819.
3. Cai Y, Ng PKL. The freshwater palaemonid prawns (Crustacea:Decapoda:Caridea) of Myanmar. *Hydrobiologia*. 2002;487(1):59–83.
4. Chen PC, Shih CH, Chu TJ, Wang D, Lee YC, Tzeng TD. Population Structure and Historical Demography of the Oriental River Prawn (*Macrobrachium nipponense*) in Taiwan. *PLoS One*. 2015;10(12):1–16.
5. Chong PKL, Khoo HW, Ng PKL. Presence of the Japanese freshwater prawn *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) (Decapoda: Caridea: Palaemonidae) in Singapore. *Zoologische Mededelingen*. 1987;61:313–317.
6. Holthuis LB. The Decapoda of the Siboga Expedicion, Part XI. The Palaemonidae collected by the Siboga and Snellins Expeditions with remarks on other species, II. Subfamily Palaemonidae. Siboga Expedition Monograph. Leiden: Brill; 1952. 253 p.
7. Li X Z, Liu RY, Liang XQ. The zoogeography of Chinese Palaemonoidea fauna. *Biodiversity Science*. 2003;11(5):393–406.
8. Ma K, Qiu G, Feng J, Li J. Transcriptome analysis of the oriental river prawn, *Macrobrachium nipponense* using 454 pyrosequencing for discovery of genes and markers. *PLoS One*. 2012;7:1–11.
9. Mashiko K. Diversified egg and clutch sizes among local populations of the freshwater prawn *Macrobrachium nipponense* (De Haan). *Journal of Crustacean Biology*. 1990;10(2):316–314.
10. Mashiko K, Numachi K. Derivation of populations with different-sized eggs in the palaemonid prawn *Macrobrachium nipponense*. *Journal of Crustacean Biology*. 2000;20(1):118–127.
11. Куренков ИИ. К биологии дальневосточных пресноводных креветок. *Труды Амурской ихтиологической экспедиции 1945–1949 гг.* 1950;1:379–390.
12. Барабанщиков ЕИ, Шаповалов МЕ. Результаты траловых съемок в озере Ханка в 2018 и 2020 гг. *Вопросы рыболовства*. 2022;23(4):97–112.
13. Mashiko K, Shy JY. Derivation of four morphologically affiliated species of *Macrobrachium* (Caridea: Palaemonidae) with divergent reproductive characteristics in northeastern Asia. *Journal of Crustacean Biology*. 2008;28(2):370–377.
14. Кулеш ВФ. *Биология культивирования промысловых видов пресноводных креветок и речных раков на теплых водах*. Москва: Новое знание; 2012. 328 с.
15. Zheng X Z, Chen WJ, Guo ZL. The genus *Macrobrachium* (Crustacea, Caridea, Palaemonidae) with the description of a new species from the Zaomu Mountain Forest Park, Guangdong Province, China. *ZooKeys*. 2019;866:65–83.
16. He X, Gong S, Zhang X, Tao R. Reproductive Biology of *Macrobrachium nipponensis* in Wuhu. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2003;14(9):1538–1542.
17. Marques H L, New MB, Boock M, Barros HP, Malasen M, Valenti WC. Integrated freshwater prawn farming: state-of-the-art and future potential. *Reviews in fisheries science aquaculture*. 2016;24(3):264–293.
18. Miao W. Freshwater prawn culture in China and its market prospects. *Aquaculture Asia*. 2005;10 (1):5–8.
19. New MB. Freshwater prawn farming: global status, recent research and a glance at the future. *Aquaculture Research*. 2005;36:210–230.
20. Nguyen AQ, Phan PD, Phan AT, Nguyen TT, Ly TN, Le PB. Experiments on seed production and commercial culture of the freshwater prawn (*Macrobrachium nipponense*). In: Poulsen A, editor. Proceedings of the 6th Technical Symposium on Mekong Fisheries, Pakse, Thailand, November 26–28. Lao: [publisher unknown]; 2003. p. 105–113.
21. Lavajoo F, Biuki NA, Khanipour AA, Mirzajani A, Fruitos JG, Akbarzadeh A. Natural diet of *Macrobrachium nipponense* shrimp from three habitats in Anzali Wetland, Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*. 2019;17(2):101–111.
22. Lin N, Wu B, Lin G, Dai Y. Comparative analysis of the development status of shrimp production in Hainan and Fujian. *Journal Modern Fishing*. 2019;1:5–7.
23. Мишарев ЮЯ. Линька и спаривание пресноводной креветки *Macrobrachium asperulum* von Martens. *Труды ВНИРО*. 1969;65:424–428.
24. Иванов БГ, Старобогатов ЯИ. Субтропические пресноводные креветки *Macrobrachium nipponense* (Palaemonidae) в водоемах Подмосковья. *Экология*. 1974;6:83–85.
25. Леонтьев ВВ. Локализация пресноводной креветки *Macrobrachium nipponense* (De Haan) в Заинском водохранилище. *Инновации и инвестиции*. 2015;3:232–234.
26. Набиева КР. Пресноводные креветки в водоемах Арнасайской системы. *Узбекский биологический журнал*. 1978;2:55–57.
27. Мирабдуллаев ИМ, Ниязов ДС. Чужеродные Decapoda (Crustacea) в Узбекистане. Чужеродные виды в голарктике (БОРОК – 2). В: Слынько ЮВ, редактор. *Тезисы докладов 2 Международного симпозиума по изучению инвазивных видов, Борок, 27 сентября – 1 октября 2005 г.* Рыбинск, Борок: [б. и.]; 2005: с. 113–114.

28. Абдурахимова АН, Мустафаева ЗА, Муллабаев НР, Сабиров ЖЖ, Бейшеева Ш, Мирабдулаев ИИ. Современное состояние водных биоценозов Айдаро-Арнасайской системы озер Узбекистана. *Вестник «Тимбо»*. 2012;5:33–40.
29. Мустафаева ЗА, Намозов СМ, Мирзаев УТ. Видовой состав и экологические формации гидробионтов озер Восточного Арнасай. *Научные труды Дальрыбвтуза*. 2022;59(1):51–62.
30. Темрешев ИИ, Есенбекова ПА, Кожобаева ГЕ, Есенова ГЖ, Сливинский ГТ. О распространении пресноводных креветок (Crustacea, Decapoda, Palaemonidae) в водоемах южного Казахстана и возможности их применения в качестве биоиндикаторов состояния водных экосистем. *Известия НАН Республики Казахстан. Серия биологическая и медицинская*. 2017;2(320):215–223.
31. Хмелева НН, Кулеш ВФ, Алехнович АВ, Гигиняк ЮГ. Экология пресноводных креветок. Минск: Беларуская навука; 1997. 254 с.
32. Алиев ДС, Шакирова ФМ, Суханова АИ. К вопросу распространения дальневосточной пресноводной креветки в водоемах Туркменистана. *Известия Академии наук Туркменской ССР. Серия биологических наук*. 1991;4:73–74.
33. Хмелева НН, Гигиняк ЮГ, Кулеш ВФ, Алехнович АВ. Биологическое обоснование вселения субтропических пресноводных креветок *Macrobrachium nipponense* в водоем-охладитель Березовской ГРЭС. Институт зоологии АН БССР. Деп. в ВИНТИИ 30.09.82, № 5014-82. *Весті АН БССР. Серія біялагічных навук*. 1983;2:119.
34. Гигиняк ЮГ, Алехнович АВ, Кулеш ВФ. Результаты интродукции субтропической пресноводной креветки *Macrobrachium nipponense* (De Haan) в водоем-охладитель Березовской ГРЭС (Беларусь). В: *VII Всероссийская конференция по промысловым беспозвоночным (памяти Б. Г. Иванова). Тезисы докладов. Мурманск, 9–13 октября 2006 г.* Москва: [б. и.]; 2006. с. 276–277.
35. Kulesh VF, Alekhovich AV. Prospects of a commercial production of a giant tropical prawn *Macrobrachium rosenbergii* (De Man) in a waste-heat discharge water of a power station of a moderate zone. In: Adamek Z, editor. *Pond Aquaculture in Central and Eastern Europe in the 21st century. Collected transaction (International Workshop) Vodnany, Czech Republic, 2001 May 2–4, European Aquacult. Vodnany, Czech Republic: Soc. Spec. Publ.; 2002. p. 67–70.*
36. Kulesh VF, Alekhovich AV. Forming of size structure and density of the oriental river shrimp *Macrobrachium nipponense* in the warm-water polyculture of the fishery ponds. *Hydrobiological Journal*. 2018;54(3):46–59.
37. Кулеш ВФ, Алехнович АВ, Солоснюк НВ. Размерно-половая структура и численность популяции восточной речной креветки в теплом сбросном канале Березовской ГРЭС в конце вегетационного сезона. *Весті БДПУ*. 2015;3:3–11.
38. Владимиров МЗ, Тодераш ИК, Чорик ФП. Восточная речная креветка (*Macrobrachium nipponense* De Haan) – новый элемент гидрофауны Кучурганского водохранилища. *Известия АН МССР. Серия биологических наук*. 1989;1:77–78.
39. Свирский ВГ, Рачек ЕИ, Андреева ИН. Результаты вселения пресноводной креветки *Macrobrachium nipponense* (De Haan) в водоем-охладитель Приморской ГРЭС. *Известия Тихоокеанского НИИ рыбного хозяйства и океанографии*. 1994;113:151–153.
40. Пирогов ВВ, Фильчаков ВА, Зинченко ТД, Карпюк МИ, Едский ЛБ. Новые элементы в составе бентофауны Волго-Камского каскада водохранилищ. *Зоологический журнал*. 1990;69(9):138–142.
41. Зинченко ТД, Головатюк ЛВ, Загорская ЕП, Антонов ПИ. Распределение инвазионных видов в составе донных сообществ Куйбышевского водохранилища: анализ многолетних исследований. *Известия Самарского Научного Центра РАН*. 2007;10(2):547–558.
42. Яковлева АВ, Яковлев ВА. Современная фауна и количественные показатели инвазионных беспозвоночных в зообентосе верхних плёсов Куйбышевского водохранилища. *Российский журнал биологических инвазий*. 2010;2:97–111.
43. Борисов РР. Современные тенденции формирования фауны десятиногих ракообразных (Decapoda) пресноводных водоемов России. В: Лукин АА, редактор. *Современное состояние биоресурсов внутренних водоемов и пути их рационального использования: материалы докладов Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 85-летию Татарского отделения ГОСНИОРХ, Казань, 24–29 октября 2016 г.* Казань: [б. и.]; 2016. с. 166–176.
44. De Grave S, Ghane A. The establishment of the Oriental river prawn, *Macrobrachium nipponense* (de Haan, 1849) in Anzali lagoon, Iran. *Aquatic Invasions*. 2006;1:204–208.
45. Khanipour AA, Noori A, Amini M, Kamrani E. Length-weight relationship and Fulton's condition factor of *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in Anzali lagoon of Iran Length-weight relationship and Fulton's condition factor of *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in Anzali lagoon of Iran. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*. 2020;19(1):496–500.
46. Lavajoo F, Biuki NA, Khanipour AA, Mirzajani A, Fruitos JG, Akbarzadeh A. An invasive shrimp species, *Macrobrachium nipponense*, in Anzali wetland demonstrated a potential source for commercial Fishing. *Journal of Aquatic Food Product Technology*. 2018;27(9):975–985.
47. Aminisarteshnizi M. Length-weight relationship and Fulton's condition factor of *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in Siah Darvishan river, Iran. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. 2021;25(2):551–560.
48. Namin JI, Nami E, Heidary S. Length-Weight Relationship and Fulton's Condition Factor of *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in Southern Coasts of the Caspian Sea. *Journal of Animal and Veterinary Advances*. 2014;13(2):109–112.
49. Gorgin S, Sudagar M. Distribution of *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in Iran (Decapoda, Palaemonidae). *Crustaceana*. 2008;81(8):943–948.
50. Salman SD, Timothy JP, Murtada DN, Ama'al GY. The invasion of *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) (Caridea: Palaemonidae) into the Southern Iraqi Marshes. *Aquatic Invasions*. 2006;1(3):109–115.
51. Cai Y, Shokita S. Report on a collection of freshwater shrimps (Crustacea: Decapoda: Caridea) from the Philippines, with descriptions of four new species. *Raffles Bulletin of Zoology*. 2006;54(2):245–270.
52. Procopio J, Daniel WM. *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849). U.S. Geological Survey, Nonindigenous Aquatic Species Database, Gainesville, FL. [Internet, cited 2023 November 16]. 2023. Available from: <https://nas.er.usgs.gov/queries/FactSheet.aspx?SpeciesID=3596> Revision Date: 4/16/2021. Access Date: 11/16/2023.
53. Surugiu V. The spread of the alien oriental river prawn *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) (Decapoda: Palaemonidae) in the lower Danube, with the first record from Romania. *BioInvasions Records*. 2022;11:1056–1066.
54. Филипенко СИ. О появлении пресноводной восточной креветки *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) в Днестре. In: *Sustainable Use and Protection of Animal World Diversity: International Symposium Dedicated to 75th Anniversary of Professor Andrei Munteanu*. Chişinău: Tipografia Academiei de StiinŃea Moldovei; 2014. p. 206–207.
55. Степанок НА. Восточная речная креветка рода *Macrobrachium* в низовье Днестра. *Гидробиологический журнал*. 2014;50(2):117–120.
56. Son MO, Novitskyi VG, Dyadichko RO. Recent state and mechanisms of invasions of exotic decapods in Ukrainian rivers. *Vestnik zoologii*. 2013;47(1):59–64.

57. Шекк ПВ, Астафуров ЮО. Влияние состава рациона и условий выращивания на проявление каннибализма у восточной пресноводной креветки *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849). *Рибогосподарська наука України*. 2017;2:49–59.
58. Shekk P, Astafurov Yu. Density of location of the eastern freshwater shrimps (*Macrobrachium nipponense* De Haan, 1849) in the lower river basin Dniester. *Ribogospodarskaya science Ukraine*. 2020;2:18–28.
59. Son MO, Morhun H, Novitskyi R O, Sidorovskiy S, Kulyk M, Utevsky S. Occurrence of two exotic decapods, *Macrobrachium nipponense* (de Haan, 1849) and *Procambarus virginalis* Lyko, 2017, in Ukrainian waters. *Knowledge Management of Aquatic Ecosyst*. 2020;421(40):1–11.
60. Zhmud M Ye, Yuryshynets V I, Liashenko A V, Zorina-Sakharova K Ye, Abramiuk II. The first record of oriental river prawn *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849 [in De Haan, 1833–1850]) (Decapoda: Palaemonidae) in the Ukrainian part of the Danube delta. *Bioinvasions Records*. 2022;11(1):192–198.
61. Bushuiev S, Snigirov S, Son MO, Sokolov I, Kharlov G, Kvach Y. Expansion of the alien east asian river prawn *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in southwestern Ukraine and assessment of its commercial usage prospects. *Aquatic Invasions*. 2023;18(2):231–246.
62. Афанасьев ДФ, Живоглядова ЛА, Небесихина НА, Магомедов МА, Муталлиева ЮК, Велибекова БД, Мирзоян А В. Обнаружение японской креветки *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) в нижнем течении реки Терек (бассейн Каспийского моря). *Российский журнал биологических инвазий*. 2020;2:2–9.
63. Живоглядова ЛА, Вехов НА, Спиридонов ВА, Гуськова ОС, Афанасьев ДФ. Первая находка восточной креветки *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) в нижнем течении реки Дон (бассейн Азовского моря). *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2021;4(1):28–34.

References

1. Chen RT, Tsai CF, Tzeng WN. Freshwater prawns (*Macrobrachium* Bate, 1868) of Taiwan with special references to their biogeographical origins and dispersion routes. *Journal of Crustacean Biology*. 2009;29(2):232–244.
2. Ahmed N, Demaine H, Muir JF. Freshwater prawn farming in Bangladesh: history, present status and future prospects. *Aquaculture Research*. 2008;39(8):806–819.
3. Cai Y, Ng PKL. The freshwater palaemonid prawns (Crustacea:Decapoda:Caridea) of Myanmar. *Hydrobiologia*. 2002;487(1):59–83.
4. Chen PC, Shih CH, Chu TJ, Wang D, Lee YC, Tzeng TD. Population Structure and Historical Demography of the Oriental River Prawn (*Macrobrachium nipponense*) in Taiwan. *PLoS One*. 2015;10(12):1–16.
5. Chong PKL, Khoo HW, Ng PKL. Presence of the Japanese freshwater prawn *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) (Decapoda: Caridea: Palaemonidae) in Singapore. *Zoologische Mededelingen*. 1987;61:313–317.
6. Holthuis LB. The Decapoda of the Siboga Expedition, Part XI. The Palaemonidae collected by the Siboga and Snellins Expeditions with remarks on other species, II. Subfamily Palaemonidae. Siboga Expedition Monograph. Leiden: Brill; 1952. 253 p.
7. Li X Z, Liu RY, Liang XQ. The zoogeography of Chinese Palaemonoidea fauna. *Biodiversity Science*. 2003;11(5):393–406.
8. Ma K, Qiu G, Feng J, Li J. Transcriptome analysis of the oriental river prawn, *Macrobrachium nipponense* using 454 pyrosequencing for discovery of genes and markers. *PLoS One*. 2012;7:1–11.
9. Mashiko K. Diversified egg and clutch sizes among local populations of the freshwater prawn *Macrobrachium nipponense* (de Haan). *Journal of Crustacean Biology*. 1990;10(2):316–314.
10. Mashiko K, Numachi K. Derivation of populations with different-sized eggs in the palaemonid prawn *Macrobrachium nipponense*. *Journal of Crustacean Biology*. 2000;20(1):118–127.
11. Kurenkov II. *K biologii dalnevostochnykh presnovodnykh krevetok* [On the biology of Far Eastern freshwater shrimp]. *Trudy Amurskoy ikhtologicheskoy ekspeditsii 1945–1949 gg.* [Proceedings of the Amur Ichthyological Expedition 1945–1949]. 1950;1:379–390. Russian.
12. Barabanshchikov EI, Shapovalov ME. *Rezultaty tralovykh syomok v ozere Khanka v 2018 i 2020 gg.* [Results of trawl surveys in Lake Khanka in 2018 and 2020]. *Voprosy rybolovstva* [Fisheries issues]. 2022;23(4):97–112. Russian.
13. Mashiko K, Shy JY. Derivation of four morphologically affiliated species of *Macrobrachium* (Caridea: Palaemonidae) with divergent reproductive characteristics in northeastern Asia. *Journal of Crustacean Biology*. 2008;28(2):370–377.
14. Kulesh VF. *Biologiya kultivirovaniya promyslovykh vidov presnovodnykh krevetok i rechnykh rakov na teplykh vodakh* [Biology of cultivation of commercial species of freshwater shrimp and crayfish in warm waters]. Moscow: Nowoye Znanie; 2012: 328 p. Russian.
15. Zheng X Z, Chen WJ, Guo ZL. The genus *Macrobrachium* (Crustacea, Caridea, Palaemonidae) with the description of a new species from the Zaomu Mountain Forest Park, Guangdong Province, China. *ZooKeys*. 2019;866:65–83.
16. He X, Gong S, Zhang X, Tao R. Reproductive Biology of *Macrobrachium nipponensis* in Wuhu. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2003;14(9):1538–1542.
17. Marques H L, New MB, Boock M, Barros HP, Malasen M, Valenti WC. Integrated freshwater prawn farming: state-of-the-art and future potential. *Reviews in fisheries science aquaculture*. 2016;24(3):264–293.
18. Miao W. Freshwater prawn culture in China and its market prospects. *Aquaculture Asia*. 2005;10 (1):5–8.
19. New MB. Freshwater prawn farming: global status, recent research and a glance at the future. *Aquaculture Research*. 2005;36:210–230.
20. Nguyen AQ, Phan PD, Phan AT, Nguyen TT, Ly TN, Le PB. Experiments on seed production and commercial culture of the freshwater prawn (*Macrobrachium nipponense*). In: Poulsen A, editor. Proceedings of the 6th Technical Symposium on Mekong Fisheries, Pakse, Thailand, November 26–28. Lao: [publisher unknown]; 2003. p. 105–113.
21. Lavajoo F, Biuki NA, Khanipour AA, Mirzajani A, Fruitos JG, Akbarzadeh A. Natural diet of *Macrobrachium nipponense* shrimp from three habitats in Anzali Wetland, Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*. 2019;17(2):101–111.
22. Lin N, Wu B, Lin G, Dai Y. Comparative analysis of the development status of shrimp production in Hainan and Fujian. *Journal Modern Fishing*. 2019;1:5–7. Chinese.
23. Misharev YuYa. *Linka i sparivaniye presnovodnoy krevetki Macrobrachium asperulum* von Martens [Molting and mating of the freshwater shrimp *Macrobrachium asperulum* von Martens]. *Trudy VNIRO* [Proceedings of VNIRO] 1969;65:424–428. Russian.
24. Ivanov BG, Starobogatov JaI. *Subtropicheskiye presnovodnyye krevetki Macrobrachium nipponense (Palaemonidae) v vodoyemakh Podmoskovyia* [Subtropical freshwater shrimp *Macrobrachium nipponense* (Palaemonidae) in water bodies of the Moscow region]. *Ecologia* [Ecology]. 1974;6:83–85. Russian.

25. Leontyev VV. *Lokalizatsiya presnovodnoy krevetki Macrobrachium nipponense (De Haan) v Zainskom vodokhranilishche* [Localization of the freshwater shrimp *Macrobrachium nipponense* (De Haan) in the Zainsky reservoir]. *Innovatsii i investitsii* [Innovation and investment]. 2015;3:232–234. Russian.
26. Nabiyeva K.R. *Presnovodnyye krevetki v vodoyemakh Arnsayskoy sistemy* [Freshwater shrimp in the reservoirs of the Arnsai system]. *Uzbekskiy biologicheskij zhurnal* [Uzbek biological journal]. 1978;2:55–57. Russian.
27. Mirabdullayev IM., Niyazov DS. *Chuzherodnyye Decapoda (Crustacea) v Uzbekistane* [Alien Decapoda (Crustacea) in Uzbekistan]. *Chuzherodnyye vidy v golarktike (BOROK – 2)*. In: *Slyno'ko YuV*, editor; et al. *Tezisy dokladov 2 Mezhdunarodnogo simpoziuma po izucheniyu invazyinykh vidov, Borok, 27 sentyabrya – 1 oktyabrya 2005 g.* [Alien species in the Holarctic (BOROK – 2): abstracts of the 2nd International Symposium on the Study of Invasive Species, Borok, September 27 – October 1, 2005]. Rybinsk, Borok: [publisher unknown]; 2005. p. 113–114. Russian.
28. Abdurahimova AN, Mustafaeva ZA, Mullabaev NR, Sabirov ZZ, Bejseeva S, Mirabdulaev II. *Sovremenoe sostoyanie vodnykh biocenozov Ajdaro-Arnasayskoy sistemy ozer Uzbekistana* [Current state of aquatic biocenoses of the Aidar-Arnasay system of lakes in Uzbekistan]. *Vestnik «Timbo»* [Bulletin «Timbo»]. 2012;5:33–40. Russian.
29. Mustafayeva ZA, Namozov SM, Mirzayev UT. *Vidovoy sostav i ekologicheskiye formatsii gidrobiontov ozer Vostochnogo Arnasaya* [Species composition and ecological formations of hydrobionts in the lakes of Eastern Arnasay]. *Nauchnyye trudy Dalrybvtuza* [Scientific works of Dalrybvtuz]. 2022;59(1)51–62. Russian.
30. Temreshev II, Yesenbekova PA, Kozhabayeva GE, Yesenova GZH, Slivinskiy GG. *O rasprostraneni presnovodnykh krevetok (Crustacea, Decapoda, Palaemonidae) v vodoyemakh yuzhnogo Kazakhstana i vozmozhnosti ikh primeneniya v kachestve bioindikatorov sostoyaniya vodnykh ekosistem* [On the distribution of freshwater shrimp (Crustacea, Decapoda, Palaemonidae) in water bodies of southern Kazakhstan and the possibility of their use as bioindicators of the state of aquatic ecosystems]. *Izvestiya NAN Respubliki Kazakhstan, seriya biologicheskaya i meditsinskaya* [Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, biological and medical series]. 2017;2(320):215–223. Russian.
31. Khmeleva NN, Kulesh VF, Alekhovich AV, Giginyak YG. *Ekologiya presnovodnykh krevetok* [Ecology of freshwater shrimp]. Minsk: Belaruskaya navuka; 1997. 254 p. Russian.
32. Aliyev DS, Shakirova F M, Sukhanova A I. *K voprosu rasprostraneniya dalnevostochnoy presnovodnoy krevetki v vodoyemakh Turkmenistana* [On the issue of the distribution of Far Eastern freshwater shrimp in the reservoirs of Turkmenistan]. *Izvestiya Akademii nauk Turkmenskoy SSR, seriya biologicheskikh nauk* [Proceedings of the Turkmen Academy of Sciences. SSR, series of biological sciences]. 1991;4:73–74. Russian.
33. Khmeleva NN, Giginyak YG, Kulesh VF, Alekhovich AV. *Biologicheskoye obosnovaniye vseleniya subtropicheskikh presnovodnykh krevetok Macrobrachium nipponense v vodoyem-okhladitel' Berezovskoy GRES; Institut zoologii AN BSSR. Dep. v VINITI 30.09.82, № 5014-82* [Biological substantiation of the introduction of subtropical freshwater shrimp *Macrobrachium nipponense* into the cooling pond of Berezovskaya SDPP. Minsk: Institute of Zoology, Academy of Sciences of the BSSR; 1982. 33 p. Dep. in VINITI 30.09.82, № 5014-82]. *Vesti Akademii nauk BSSR, seriya biyalagichnykh nauk* [Proceedings of the Academy of Sciences of the BSSR, series of biological sciences]. 1983;2:119. Russian.
34. Giginyak YU G, Alekhovich A.V, Kulesh VF. *Rezultaty introduktsii subtropicheskoy presnovodnoy krevetki Macrobrachium nipponense (De Haan) v vodoyem-okhladitel' Berezovskoy GRES (Belarus)* [Results of introduction of subtropical freshwater shrimp *Macrobrachium nipponense* (De Haan) into the cooling pond of Berezovskaya SDPP (Belarus)]. In: *VII Vserossiyskaya konferentsiya po promyslovym bespozvonochnyim (pamyati B. G. Ivanova). Tezisy dokladov (Murmansk, 9–13 oktyabrya 2006 g.)*. [VII All-Russian Conference on commercial invertebrates (in memory of B. G. Ivanov). Abstracts (Murmansk, 2006 October 9–13)]. Moscow: [publisher unknown]; 2006. p. 276–277. Russian.
35. Kulesh VF, Alekhovich AV. *Prospects of a commercial production of a giant tropical prawn Macrobrachium rosenbergii (De Man) in a waste-heat discharge water of a power station of a moderate zone*. In: Adamek Z, editor. *Pond Aquaculture in Central and Eastern Europe in the 21st century*. Collected transaction (International Workshop) Vodnany, Czech Republic, 2001 May 2–4, European Aquacult. Vodnany, Czech Republic: Soc. Spec. Publ.; 2002. p. 67–70.
36. Kulesh VF, Alekhovich AV. *Forming of size structure and density of the oriental river shrimp Macrobrachium nipponense in the warm-water polyculture of the fishery ponds*. *Hydrobiological Journal*. 2018;54(3):46–59.
37. Kulesh VF, Alekhovich AV, Solosnyuk NV. *Razmerno-polovaya struktura i chislennost' populyatsii vostochnoy rechnoy krevetki v teplom sbrosnom kanale Berezovskoy GRES v kontse vegetatsionnogo sezona* [Size-sex structure and population size of the eastern river shrimp in the warm discharge channel of Berezovskaya SDPP at the end of the growing season]. *Vesti BDPU* [BDPU Proceedings]. 2015;3:3–11. Russian.
38. Vladimirov MZ, Toderash IK, Chorik FP. *Vostochnaya rechnaya krevetka (Macrobrachium nipponense De Haan) – novyy element gidrofauny Kuchurganskogo vodokhranilishcha* [Eastern river shrimp (*Macrobrachium nipponense* De Haan) – a new element of hydrofauna of the Kuchurgan reservoir]. *Izvestiya Akademii nauk MSSR, seriya biologicheskikh nauk* [Proceedings of the Academy of Sciences of the MSSR. Series of Biological Sciences]. 1989;1:77–78. Russian.
39. Svirskiy VG, Rachek YEI, Andreyeva IN. *Rezultaty vseleniya presnovodnoy krevetki Macrobrachium nipponense (De Haan) v vodoyem-okhladitel' Primorskoy GRES* [Results of introduction of the freshwater shrimp *Macrobrachium nipponense* (De Haan) into the cooling pond of Primorskaya SDPP]. *Izvestiya Tikhookeanskogo NII rybnogo khozyaystva i okeanografii* [Proceedings of the Pacific Research Institute of Fisheries and Oceanography]. 1994;113:151–153. Russian.
40. Pirogov VV, Fil'chakov VA, Zinchenko TD, Karpuyuk MI, Yedskiy LB. *Novyye elementy v sostave bentofauny Volgo-Kamskogo kaskada vodokhranilishch* [New elements in the composition of benthofauna of the Volga-Kama cascade of reservoirs]. *Zoologicheskij zhurnal* [Journal of Zoology]. 1990;69(9):138–142. Russian.
41. Zinchenko TD., Golovatyuk LV, Zagorskaya YEP, Antonov PI. *Raspredeleniye invazionnykh vidov v sostave donnykh soobshchestv Kuybyshevskogo vodokhranilishcha: analiz mnogoletnikh issledovaniy* [Distribution of invasive species in benthic communities of the Kuibyshev reservoir: analysis of long-term studie]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2007;10(2):547–558. Russian.
42. Yakovleva AV., Yakovlev VA. *Sovremennaya fauna i kolichestvennyye pokazateli invazionnykh bespozvonochnykh v zoobentose verkhnikh plosov Kuybyshevskogo vodokhranilishcha* [Current fauna and quantitative indicators of invasive invertebrates in the zoobenthos of the upper sloughs of the Kuibyshev reservoir]. *Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy* [Russian Journal of Biological Invasions] 2010;2:97–111. Russian.

43. Borisov RR. *Sovremennyye tendentsii formirovaniya fauny desyatinogikh rakoobraznykh (Decapoda) presnovodnykh vodoyemov Rossii* [Current trends in the fauna of decapod crustaceans (Decapoda) of freshwater bodies in Russia]. In: Lukin AA, editor. *Sovremennoye sostoyaniye bioresursov vnutrennikh vodoyemov i puti ikh ratsional'nogo ispol'zovaniya: materialy dokladov Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennoy 85-letiyu Tatarskogo otdeleniya GOSNIORKH, Kazan, 24–29 oktyabrya 2016 g. FGBNU «GosNIORKH»*. [Current state of bioresources of inland water bodies and ways of their rational use: Proceedings of the All-Russian Conference with international participation, dedicated to the 85th anniversary of the Tatar branch of GOSNIORKh, Kazan, 2016 October 24–29. FGBNU «GosNIORKh». Kazan: [publisher unknown]; 2016. p. 166–176. Russian.
44. De Grave S, Ghane A. The establishment of the Oriental river prawn, *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in Anzali lagoon, Iran. *Aquatic Invasions*. 2006;1:204–208.
45. Khanipour AA, Noori A, Amini M, Kamrani E. Length-weight relationship and Fulton's condition factor of *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in Anzali lagoon of Iran Length-weight relationship and Fulton's condition factor of *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in Anzali lagoon of Iran. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*. 2020;19(1):496–500.
46. Lavajoo F, Biuki NA, Khanipour AA, Mirzajani A, Fruitos JG, Akbarzadeh A. An invasive shrimp species, *Macrobrachium nipponense*, in Anzali wetland demonstrated a potential source for commercial Fishing. *Journal of Aquatic Food Product Technology*. 2018;27(9):975–985.
47. Aminisarteshnizi M. Length-weight relationship and Fulton's condition factor of *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in Siah Darvishan river, Iran. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*. 2021;25(2):551–560.
48. Namin JI, Nami E, Heidary S. Length-Weight Relationship and Fulton's Condition Factor of *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in Southern Coasts of the Caspian Sea. *Journal of Animal and Veterinary Advances*. 2014;13(2):109–112.
49. Gorgin S, Sudagar M. Distribution of *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in Iran (Decapoda, Palaemonidae). *Crustaceana*. 2008;81(8):943–948.
50. Salman SD, Timothy JP, Murtada DN, Ama'al GY. The invasion of *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) (Caridea: Palaemonidae) into the Southern Iraqi Marshes. *Aquatic Invasions*. 2006;1(3):109–115.
51. Cai Y, Shokita S. Report on a collection of freshwater shrimps (Crustacea: Decapoda: Caridea) from the Philippines, with descriptions of four new species. *Raffles Bulletin of Zoology*. 2006;54(2):245–270.
52. Procopio J, Daniel WM. *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849). U.S. Geological Survey, Nonindigenous Aquatic Species Database, Gainesville, FL. [Internet, cited 2023 November 16]. 2023. Available from: <https://nas.er.usgs.gov/queries/FactSheet.aspx?SpeciesID=3596> Revision Date: 4/16/2021. Access Date: 11/16/2023.
53. Surugiu V. The spread of the alien oriental river prawn *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) (Decapoda: Palaemonidae) in the lower Danube, with the first record from Romania. *BioInvasions Records*. 2022;11:1056–1066.
54. Filipenko S I. *O poyavlenii presnovodnoy vostochnoy krevetki Macrobrachium nipponense (De Haan, 1849) v Dnestre* [The occurrence of the freshwater oriental shrimp *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in the Dniester]. In: Sustainable Use and Protection of Animal World Diversity. International Symposium Dedicated to the 75th Anniversary of Professor Andrei Munteanu. Chişinău: Tipografia Academiei de ŞtiinŃe Moldovei; 2014. p. 206–207. Russian.
55. Stepanok NA. *Vostochnaya rechnaya krevetka roda Macrobrachium v nizovye Dnestra* [Eastern river shrimp of the genus *Macrobrachium* in the lower Dniester basin. *Gidrobiologicheskij zhurnal* [Journal of Hydrobiology]. 2014;50(2):117–120. Russian.
56. Son MO, Novitskiy VG, Dyadichko RO. Recent state and mechanisms of invasions of exotic decapods in Ukrainian rivers. *Vestnik zoologii*. 2013;47(1):59–64.
57. Shekk PV, Astafurov YO. *Vliyaniye sostava ratsiona i usloviy vyrashchivaniya na proyavleniye kannibalizma u vostochnoy presnovodnoy krevetki Macrobrachium nipponense (De Haan, 1849)* [Effects of diet composition and rearing conditions on the occurrence of cannibalism in the eastern freshwater shrimp *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849)]. *Ribogospodars'ka nauka Ukraïni* [Fisheries science in Ukraine]. 2017;2:49–59. Russian.
58. Shekk P, Astafurov Yu. Density of location of the eastern freshwater shrimps (*Macrobrachium nipponense* De Haan, 1849) in the lower river basin Dniester. *Ribogospodarskaya science Ukraine*. 2020;2:18–28.
59. Son MO, Morhun H, Novitskiy R O, Sidorovskiy S, Kulyk M, Utevskiy S. Occurrence of two exotic decapods, *Macrobrachium nipponense* (de Haan, 1849) and *Procambarus virginalis* Lyko, 2017, in Ukrainian waters. *Knowledge Management of Aquatic Ecosyst*. 2020;421(40):1–11.
60. Zhmud M Ye, Yuryshynets V I, Liashenko A V, Zorina-Sakharova K Ye, Abramiuk II. The first record of oriental river prawn *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849 [in De Haan, 1833–1850]) (Decapoda: Palaemonidae) in the Ukrainian part of the Danube delta. *Bioinvasions Records*. 2022;11(1):192–198.
61. Bushuiev S, Snigirov S, Son MO, Sokolov I, Kharlov G, Kvach Y. Expansion of the alien east asian river prawn *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in southwestern Ukraine and assessment of its commercial usage prospects. *Aquatic Invasions*. 2023;18(2):231–246.
62. Afanasyev DF, Zhivoglyadova LA, Nebesikhina NA, Magomedov MA, Mutalliyeva YUK, Velibekova BD, Mirzoyan AV. *Obnaruzheniye yaponskoy krevetki Macrobrachium nipponense (De Haan, 1849) v nizhnem techenii reki Terek (basseyn Kaspiyskogo morya)* [Detection of the Japanese shrimp *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in the lower reaches of the Terek River (Caspian Sea basin)]. *Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy* [Russian Journal of Biological Invasions]. 2020;2:2–9. Russian.
63. Zhivoglyadova LA, Vekhov NA, Spiridonov VA, Guskova OS, Afanasyev DF. *Pervaya nakhodka vostochnoy krevetki Macrobrachium nipponense (De Haan, 1849) v nizhnem techenii reki Don (basseyn Azovskogo morya)* [First discovery of the eastern shrimp *Macrobrachium nipponense* (De Haan, 1849) in the lower reaches of the Don River (Azov Sea basin)]. *Vodnyye bioresursy i sreda obitaniya* [Aquatic bioresources and habitat]. 2021;4(1):28–34. Russian.

УДК 630*182.47:630*228.8(630*176.321.5)

ЗАПАС НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ НИЖНИХ ЯРУСОВ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ЧЕРНООЛЬШАНИКЕ ПАПОРОТНИКОВОМ НА ЮГО-ВОСТОКЕ ПОЛЕСЬЯ

А. В. УГЛЯНЕЦ¹⁾, С. В. ШУМАК¹⁾, Д. К. ГАРБАРУК¹⁾

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

Оценка биологической продуктивности нижних ярусов лесной растительности, особенно в труднодоступных черноольховых лесах, весьма актуальна. Изучение запаса их надземной фитомассы в насаждениях черноольшаника папоротникового (*Gluninosa-Alnetum filicosum*) проводилось методом укусов, общего проективного покрытия почвы с использованием цифровой фотографии, других ценотических показателей, традиционными методами. Место исследования – зона отчуждения Чернобыльской атомной электростанции в границах Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, расположенная на крайнем юго-востоке Белорусского Полесья. Установлено, что в составе нижних ярусов черноольшаника папоротникового произрастает 44 вида растений. Доминируют инвазивный вредоносный вид череда олиственная (*Bidens frondosus* L.) и нитрофильный аборигенный вид крапива двудомная (*Urtica dioica* L.). Субдоминируют с ними или содоминируют в различных сочетаниях 10 других видов растений, характеризующихся высоким обилием и располагающихся в верхнем подъярусе травяного покрова. Запас абсолютно сухой надземной фитомассы нижних ярусов растительности в черноольшанике папоротникового составляет 574 (407–872) кг/га, общее проективное покрытие почвы – 72 (48–90) %. Высокая пространственная вариативность этих показателей обусловила среднюю корреляционную зависимость между ними. На запас надземной фитомассы нижних ярусов растительности и их общее проективное покрытие, пространственную неоднородность и временную изменчивость влияет комплекс внешних экологических факторов: видовой состав и густота древостоя, густота подроста и подлеска, погодно-климатические условия, местоположение лесных насаждений в рельефе, расстояние до объектов гидромелиоративной сети, дикие копытные животные и внутренние факторы самих травяных сообществ (видовой состав, обилие и морфометрические характеристики преобладающих видов).

Ключевые слова: Белорусское Полесье; черноольшаник папоротниковый (*Gluninosa-Alnetum filicosum*); нижний ярус лесной растительности; запас надземной фитомассы; общее проективное покрытие почвы; экологический фактор.

Образец цитирования:

Углынец АВ, Шумак СВ, Гарбарук ДК. Запас надземной фитомассы нижних ярусов лесной растительности в черноольшанике папоротникового на юго-востоке Полесья. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2025;1:24–36.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-24-36>

For citation:

Uglyanets AV, Shumak SV, Garbaruk DK. Aboveground phytomass stock of the lower tiers of forest vegetation in black alder fern forest type in the south-east of Polesie. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2025;1:24–36. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-24-36>

Авторы:

Анатолий Владимирович Углынец – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; ведущий научный сотрудник отдела экологии растительных комплексов.
Светлана Васильевна Шумак – аспирант, младший научный сотрудник отдела экологии растительных комплексов.
Дмитрий Константинович Гарбарук – заведующий отделом экологии растительных комплексов.

Authors:

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

ABOVEGROUND PHYTOMASS STOCK OF THE LOWER TIERS OF FOREST VEGETATION IN BLACK ALDER FERN FOREST TYPE IN THE SOUTH-EAST OF POLESIE

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

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

Assessment of biological productivity of the lower tiers of forest vegetation, especially in hard-to-reach black alder forests is very relevant. The study of the stock of their aboveground phytomass in stands of black alder fern forest type (*Gluninosa-Alnetum filicosum*) was carried out using the mowing method, the general projective soil cover using digital photography, and other cenotic indicators using traditional methods. The study site was the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant, coinciding with the boundaries of the Polesky State Radiation and Ecological Reserve, located in the extreme south-east of the Belarusian Polesie. It was found that 44 plant species grow in the lower tiers of black alder fern forest type. Invasive pest species *Bidens frondosus* L. and nitrophilic native species *Urtica dioica* L. dominate. Subdominant with them or co-dominant in various combinations are 10 other plant species characterized by high abundance and located in the upper sub-tier of the grass cover. The stock of absolutely dry aboveground phytomass of lower vegetation tiers in black alder fern forest type 574 (407–872) kg/ha, total projective soil coverage – 72 (48–90) %. High spatial variability of these indicators determined the average correlation dependence between them. The stock of aboveground phytomass of lower vegetation tiers and their total projective cover, spatial heterogeneity and temporal variability are influenced by a complex of external environmental factors. These include species composition and stand density, density of undergrowth and underforest, weather and climatic conditions, location of forest stands in the relief, distance to the objects of hydro-reclamation network, wild ungulates and internal factors of grass communities themselves (species composition, abundance and morphometric characteristics of dominant species).

Keywords: Belarusian Polesie region; black alder fern forest type (*Gluninosa-Alnetum filicosum*); the lower tier of forest vegetation; stock of phytomass; ecological factor.

Введение

Сведения о запасах надземной фитомассы (ЗНФ) живого напочвенного покрова (ЖНП) в черноольшаниках кисличном, черничном, крапивном, осоковом и снытевом Белорусского Полесья (Полесье) приведены в работах [1–3]. Изучение массы травяного покрова в насаждениях черноольшаника папоротникового (*Gluninosa-Alnetum filicosum*), покрывающего 7,2 % площади черноольховой формации в Полесье и занимающего в ней четвертое место по распространенности [4], не проводилось.

Продуктивность надземной фитомассы ЖНП лесных насаждений связана с его ценогическими показателями – видовым составом, общим проективным покрытием почвы (ОПП), облием и морфометрическими характеристиками отдельных видов [2; 3; 5–8]. Процесс ее определения длительный и трудоемкий [5]. Установлено [2; 3; 6–8], что ЗНФ ЖНП наиболее тесно связан с его ОПП, которое определяется намного быстрее как посредством визуальной оценки классическими методами [5; 9–11], так и с применением современных цифровых технологий [5; 7; 12; 13]. Использование этого показателя дает возможностькратно ускорить определение ЗНФ ЖНП в лесном фитоценозе.

На величины ЗНФ и ОПП ЖНП влияет комплекс внешних экологических факторов – условия место-произрастания, видовой состав и структура лесного фитоценоза, характеристики отдельных его элементов (древостоя, подрост, подлеска) [14–19], погоднo-климатические условия [17; 20; 21], определяющие световой, тепловой и водный режимы травяно-кустарничкового и мохового ярусов растительных сообществ. Существенное влияние на ценогические характеристики ЖНП черноольховых лесов оказывает потепление и аридизация климата в Полесье [22; 23] в совокупности с последствиями широкомасштабных гидротехнических мелиораций болот и заболоченных земель, проведенных в 1950–1980-х гг. [24].

Цель исследования – установить запас надземной фитомассы и общее проективное покрытие почвы нижних ярусов растительности в черноольшанике папоротниковом на юго-востоке Полесья, выявить связь между ними и определить влияющие на них факторы.

Материалы и методы исследования

Объект исследований – надземная фитомасса нижних ярусов растительности (НЯР), включающая травянистые и полукустарниковые виды растений [25] в насаждениях черноольшаника папоротникового на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ),

расположенного на крайнем юго-востоке Полесья в границах белорусского сектора зоны отчуждения (ЗО) Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), находящегося в зоне оптимального произрастания ольхи черной [26]. Ее насаждения в заповеднике в 2020 г. занимали 10,6 % лесопокрытой площади. Третья их часть (34,2 %) приходилась на папоротниковый тип леса.

В насаждениях черноольшаника папоротникового заложили 5 временных пробных площадей (ВПП) в соответствии с требованиями «Справочника таксатора» [Мирошников и др., 1980]. При расчете таксационных показателей использовали источник [27]. Исследования проведены в высоковозрастных высокополнотных насаждениях ольхи черной, преимущественно I класса бонитета (табл. 1).

Таблица 1

Таксационные показатели древостоев ольхи черной

Table 1

Taxation indicators of black alder stands

Шифр ВПП	Состав древостоя	Возраст, лет	Средние		Класс бонитета	Густота, шт./га	Сумма площадей сечений, м ² /га	Полнота	Запас, м ³ /га	Среднее изменение запаса, м ³ /га
			Н, м	D, см						
Нп9-11	9Олч1Б+Д	51	23,5	22,1	I	864	33,4	0,89	376	7,4
Нп77-29	10Олч+Д,Б	62	24,4	28,7	I	568	36,0	0,96	434	7,0
Нп10-26	9Олч1Б+Д,Я	65	24,7	28,6	I	560	33,2	0,88	392	6,0
Б611-20	10Олч+Б,Лп	70	28,0	32,0	I	504	39,2	0,98	540	7,7
Нп77-16	10Олч+Д,Б,Я	75	30,3	37,1	Ia	444	46,2	1,13	632	8,4

Учет подроста и подлеска проводили на 5 учетных площадках (УП) размером 5×5 м на каждой ВПП по видам растений в соответствии с ТКП 498-2013 (02080) «Радиационный мониторинг лесного фонда. Закладка постоянного пункта наблюдения. Порядок проведения».

Изучение характеристик НЯР проводили с 19.07 по 3.08.2023 г. в соответствии с методикой [10] путем закладки на каждой ВПП 20 УП размером 1×1 м. На каждой УП выявляли видовой состав сосудистых растений НЯР, уточняли его с помощью определителя [28], устанавливали их обилие в баллах по шкале Браун-Бланке [29], измеряли высоты растений каждого вида. ОПП оценивали с использованием цифровой фотографии в соответствии с работой [7].

Отбор образцов надземной фитомассы НЯР производили методом укусов на 10 УП (каждой четной) в соответствии с методическими указаниями [30] с разделением массы трав по видам. Предыдущим исследованием [3] установлено, что масса растений одного вида ЖНП с баллом обилия 1 и менее не превышает 10 % от общей в сообществе. Растения с таким обилием относили к категории «разнотравье» с объединением их в одну общую пробу согласно [31].

Образцы фитомассы в полевых условиях взвешивали в свежем состоянии; в лабораторных – высушивали до постоянного веса в сушильном шкафу при температуре 105 °С [32] и рассчитывали ЗНФ для каждой УП, ВПП и типа леса.

Обработку снимков и определение по ним ОПП производили с использованием компьютерных программ ACDSee Photo Manager 12, Corel Draw X3 и ImageJ.

Для каждой ВПП рассчитывали общую густоту и среднюю арифметическую высоту подроста и подлеска, средний балл обилия, среднюю высоту и встречаемость видов НЯР с баллом обилия 2 и выше, а также ОПП всеми видами растений.

Статистический анализ полученных данных производили с использованием программ *Microsoft Excel 2007* и *Statistica 6.0*.

Результаты исследования и их обсуждение

Запас надземной фитомассы. В черноольшанике папоротниковом средний арифметический ЗНФ НЯР (здесь и далее по тексту все доверительные интервалы на 95 % уровне значимости находятся в пределах выборок) составляет 574 кг/га при стандартной ошибке 41,7 кг/га и точности 7,3 %. Среднеарифметический ее диапазон по насаждениям варьирует в пределах 407–872 кг/га (табл. 2). Для сравнения отметим, что в черноольшанике кисличном Полесья ЗНФ ЖНП составлял 95, черничном – 288 [2], снытевом – 607 [3], крапивном – 730 и осоковом – 1110 [1] кг/га.

Таблица 2

Статистические показатели запаса надземной фитомассы
и общего проективного покрытия почвы нижними ярусами растительности

Table 2

Statistical indices of aboveground phytomass stock and total projective cover of soil by lower tiers of vegetation

Статистический показатель	На ВПП					В типе леса
	Нп9-11	Нп10-26	Нп77-16	Б611-20	Нп77-29	
Запас надземной фитомассы, кг/га						
<i>n</i>	10	10	10	10	10	50
min-max	135-779	109-813	233-1101	249-891	515-1725	109-1725
<i>Ci</i>	261-553	412-691	336-741	353-652	612-1132	491-658
<i>M ± m</i>	407 ± 64,6	551 ± 61,8	539 ± 89,5	503 ± 66,0	872 ± 115,0	574 ± 41,7
σ	204	195	283	209	364	295
<i>Cv</i>	50,1	35,3	52,5	41,5	41,7	51,3
<i>p</i>	15,9	11,2	16,6	13,1	13,2	7,3
Общее проективное покрытие почвы, %						
<i>n</i>	20	20	20	20	20	100
min-max	14-79	14-93	57-98	67-95	79-97	14-98
<i>Ci</i>	39-58	46-63	78-88	82-88	87-92	68-76
<i>M ± m</i>	48 ± 4,5	55 ± 3,9	83 ± 2,3	85 ± 1,6	90 ± 1,1	72 ± 2,2
σ	20	17	10	7	5	22
<i>Cv</i>	41,0	31,0	12,0	8,0	5,0	29,0
<i>p</i>	9,4	7,1	2,8	1,9	1,2	3,0

Примечание. *n* – количество наблюдений (УП), min и max – минимальное и максимальное значения, *Ci* – доверительный интервал на 95 % уровне значимости, *M* – среднееарифметическое значение, $\pm m$ – стандартная ошибка среднего значения, σ – среднеквадратическое отклонение, *Cv* – коэффициент вариации, %, *p* – точность исследования.

Для черноольшаника папоротникового характерен очень широкий размах колебаний частных определений ЗНФ НЯР на УП – 109–1725 кг/га, или 15,8 раза. Различия среднееарифметического количества фитомассы НЯР между ВПП составляют от 2,2 % до 2,1 раза. О высокой вариабельности анализируемого признака в типе леса свидетельствуют его высокие стандартное отклонение (295 кг/га) и коэффициент вариации (51,3 %). В более молодых лиственных фитоценозах на торфянисто-подзолисто-глееватых почвах Республики Коми (Россия) коэффициенты вариации данного показателя (21,3–35,3 %) в 1,4–2,4 раза ниже [8]. Тем не менее, пространственное распределение ЗНФ НЯР в типе леса можно считать вполне однородным, так как только одно насаждение (Нп77-29) достоверно отличается от остальных (табл. 3).

Таблица 3

Достоверность различий запаса надземной фитомассы (числитель)
и общего проективного покрытия почвы нижними ярусами растительности (знаменатель)

Table 3

Reliability of differences in aboveground phytomass stock (numerator)
and total projective cover of soil by lower tiers of vegetation (denominator)

ВПП	Нп9-11	Нп10-26	Нп77-16	Б611-20
Нп10-26	1,531 / 1,162	–	–	–
Нп77-16	1,135 / 6,823	0,105 / 6,188	–	–
Б611-20	0,986 / 7,611	0,504 / 7,113	0,307 / 0,714	–
Нп77-29	3,343 / 8,880	2,332 / 8,610	2,167 / 2,729	2,640 / 2,534

Примечание. Для всех вариантов сравнений ЗНФ критерий Стьюдента равен 2,101, ОПП – 2,024.

Общее проективное покрытие почвы НЯР. С высокой точностью (3,0 %) установлено, что среднее арифметическое значение ОПП НЯР в черноольшанике папоротниковом составляет $72 \pm 2,2$ % при коэффициенте вариации 29,0 % (табл. 2). Данному показателю свойственна пространственная неоднородность, на что указывают широкий размах колебания индивидуальных значений ОПП на УП (14–98 %) и средних на ВПП (48–90 %), высокие коэффициенты вариации средних величин в отдельных насаждениях. В 80 % случаев наблюдаются достоверные различия этого признака между насаждениями (табл. 3).

Связь ЗНФ с ОПП НЯР. Ненормальные распределения сравниваемых показателей (табл. 4) предопределили расчет статистической их взаимозависимости с применением непараметрического коэффициента ранговой корреляции Спирмена (r).

Таблица 4

Проверка переменных на нормальность распределения

Table 4

Checking variables for normality of distribution

Параметр	Общее проективное покрытие	Запас надземной фитомассы
Критерий Шапиро – Уилка (W)	0,92	0,91
Уровень значимости (p), %	0,001	0,002

Установлена умеренная ($r = 0,36$) значимая ($p < 0,05$), здесь и далее по Чеддоку, корреляция ЗНФ НЯР с его ОПП для 50 УП и средняя ($r = 0,60$) незначимая ($p > 0,05$) – для 5 ВПП. Функциональная зависимость между этими признаками по данным 50 УП наиболее достоверно ($R^2 = 0,28$) аппроксимируется уравнением экспоненциальной кривой:

$$M = 183,21 \times \exp^{(0,014 \times \text{ОПП})},$$

по данным 5 ВПП – уравнением полиномиальной кривой второй степени ($R^2 = 0,52$):

$$M = 0,51 \times \text{ОПП}^2 - 64,8 \times \text{ОПП} + 2428,$$

где M – запас надземной фитомассы НЯР, кг/га, ОПП – общее проективное покрытие, %.

Адекватность приведенных уравнений подтверждается статистически значимыми отличиями от 0 ($p < 0,05$) коэффициентов регрессий.

Отметим, что для 5 лиственных (березовых и черноольховых) насаждений Полесья получена линейная зависимость ОПП от продуктивности НЯР ($R^2 = 0,86$) [2].

Ценоотическая характеристика НЯР. Видовой состав НЯР черноольшаника папоротникового в 2023 г. включал 44 вида растений [25]. Степень его включения в список флоры травянистых растений этого типа леса Беларуси, или индекс Симпсона (по [26]), составлял 53,3 %, Полесья (по [4]) – 21,0 %. В 2020 г. в этих насаждениях было зарегистрировано 35 видов [33], а приведенные выше индексы, рассчитанные по данным этой работы, составляли 27,0 и 28,8 % соответственно, что указывает на изменение видового состава НЯР во времени.

Согласно белорусским лесотипологическим таблицам [34], в черноольшанике папоротниковом основными индикаторными видами травянистых растений являются кочедыжник женский, недотрога обыкновенная, щитовник шартрский, крапива двудомная, таволга вязолистная, селезеночник очереднолистный, осоки сероватая и удлиненная, лютик ползучий, паслен сладко-горький, подмаренники болотный и цепкий, телиптерис болотный, вербейник обыкновенный, тростник. Из данного перечня для преобладающих видов этого типа леса в Полесье не указаны селезеночник, подмаренники и телиптерис, но отмечено присутствие зюзника европейского, осоки пузырчатой, касатика ложноаирового, белокрыльника болотного, калужницы болотной [4]. Количество индикаторных видов в исследованных насаждениях составляет 53,3 % от их количества в типе леса [34], а число преобладающих видов – 75 % от числа таковых в черноольшаниках папоротниковых Полесья.

По обилию в 2023 г. в черноольшанике папоротниковом доминировали инвазионный вредоносный вид череда олиственная и аборигенный ниторофил крапива двудомная. Субдоминировали с ними или содоминировали в разных сочетаниях касатик ложноаировый, луговик дернистый, ежевика сизая, тростник обыкновенный, щитовники шартрский и мужской, шлемник обыкновенный, осоки ложносытевая и пузырчатая, подмаренник душистый. Содоминантами также являлись крапива двудомная и череда олиственная (табл. 5).

Ценотическая характеристика преобладающих видов нижних ярусов растительности

Table 5

Cenotic characterization predominant species of lower tiers of vegetation

Вид растения	На ВПП										В типе леса	
	Нп9-11		Нп10-26		Нп77-16		Б611-20		Нп77-29			
	$\frac{V}{H}$	$\frac{A}{M}$	$\frac{V}{H}$	$\frac{A}{M}$	$\frac{V}{H}$	$\frac{A}{M}$	$\frac{V}{H}$	$\frac{A}{M}$	$\frac{V}{H}$	$\frac{A}{M}$	$\frac{V}{H}$	$\frac{M}{M(\%)}$
Луговик дернистый	$\frac{45}{36,2}$	$\frac{\pm}{83,8}$	$\frac{90}{59,4}$	$\frac{2}{414,2}$	–	–	–	–	$\frac{15}{80,7}$	$\frac{2}{159,1}$	$\frac{30}{58,8}$	$\frac{131,4}{22,9}$
Черда олиственная	–	–	–	–	$\frac{100}{54,3}$	$\frac{3}{85,1}$	$\frac{100}{53,5}$	$\frac{4}{218,3}$	$\frac{90}{74,2}$	$\frac{2}{124,1}$	$\frac{58}{60,7}$	$\frac{85,5}{14,9}$
Ежевика сизая	$\frac{5}{28,0}$	$\frac{2}{-}$	$\frac{55}{39,5}$	$\frac{1}{-}$	$\frac{90}{25,4}$	$\frac{2}{139,7}$	$\frac{50}{28,5}$	$\frac{1}{25,2}$	$\frac{95}{26,4}$	$\frac{2}{215,0}$	$\frac{59}{29,6}$	$\frac{76,0}{13,2}$
Тростник обыкновенный	–	–	–	–	$\frac{40}{156,5}$	$\frac{2}{125,4}$	–	–	$\frac{15}{185,7}$	$\frac{2}{87,0}$	$\frac{11}{171,1}$	$\frac{42,5}{7,4}$
Крапива двудомная	$\frac{20}{14,0}$	$\frac{1}{-}$	–	–	$\frac{100}{10,0}$	$\frac{3}{44,9}$	$\frac{80}{7,1}$	$\frac{1}{15,4}$	$\frac{100}{35,4}$	$\frac{2}{80,9}$	$\frac{60}{16,6}$	$\frac{28,2}{4,9}$
Касатик ложноаировый	$\frac{10}{102,5}$	$\frac{2}{16,7}$	–	–	$\frac{10}{115,0}$	$\frac{2}{38,6}$	$\frac{10}{103,5}$	$\frac{2}{26,7}$	$\frac{10}{104,0}$	$\frac{2}{36,3}$	$\frac{8}{106,2}$	$\frac{23,7}{4,1}$
Зюзник европейский	–	–	–	–	$\frac{35}{21,4}$	$\frac{\pm}{-}$	$\frac{80}{42,2}$	$\frac{1}{38,1}$	$\frac{75}{29,3}$	$\frac{1}{78,9}$	$\frac{31}{38,0}$	$\frac{23,4}{4,1}$
Осока ложносытевая	$\frac{65}{61,9}$	$\frac{2}{99,2}$	–	–	–	–	–	–	–	–	$\frac{13}{61,9}$	$\frac{19,8}{3,5}$
Осока пузырчатая	–	–	$\frac{70}{50,4}$	$\frac{2}{83,0}$	–	–	–	–	–	–	$\frac{14}{50,4}$	$\frac{16,6}{2,9}$
Осока пепельно-серая	$\frac{15}{27,7}$	$\frac{1}{59,6}$	–	–	–	–	$\frac{30}{24,3}$	$\frac{\pm}{-}$	$\frac{10}{30,0}$	$\frac{1}{-}$	$\frac{11}{27,3}$	$\frac{11,9}{2,1}$
Щитовник шартрский	$\frac{55}{21,5}$	$\frac{1}{50,9}$	$\frac{15}{27,0}$	$\frac{2}{6,0}$	–	–	–	–	$\frac{10}{26,0}$	$\frac{2}{-}$	$\frac{16}{24,8}$	$\frac{11,4}{2,0}$
Вейник седеющий	–	–	–	–	$\frac{50}{28,1}$	$\frac{\pm}{-}$	$\frac{60}{40,4}$	$\frac{1}{56,3}$	–	–	$\frac{22}{34,3}$	$\frac{11,3}{2,0}$
Подмаренник душистый	$\frac{10}{22,5}$	$\frac{2}{4,6}$	$\frac{5}{4,0}$	$\frac{r}{-}$	$\frac{35}{17,0}$	$\frac{\pm}{22,6}$	$\frac{40}{16,6}$	$\frac{1}{-}$	$\frac{25}{7,6}$	$\frac{\pm}{-}$	$\frac{25}{13,3}$	$\frac{5,4}{0,9}$
Калужница болотная	–	–	–	–	–	–	$\frac{15}{46,0}$	$\frac{2}{17,4}$	$\frac{5}{19,0}$	$\frac{1}{-}$	$\frac{4}{32,5}$	$\frac{3,5}{0,6}$
Шлемник обыкновенный	$\frac{70}{12,6}$	$\frac{\pm}{3,5}$	–	–	$\frac{15}{36,0}$	$\frac{2}{-}$	$\frac{15}{21,0}$	$\frac{\pm}{-}$	$\frac{40}{19,8}$	$\frac{2}{11,2}$	$\frac{28}{22,3}$	$\frac{2,9}{0,5}$
Щитовник мужской	–	–	–	–	$\frac{10}{35,0}$	$\frac{2}{5,5}$	$\frac{10}{24,0}$	$\frac{2}{7,7}$	$\frac{5}{19,0}$	$\frac{2}{-}$	$\frac{5}{26,0}$	$\frac{2,6}{0,5}$
Горец мягкий	$\frac{35}{12,6}$	$\frac{\pm}{-}$	–	–	$\frac{85}{26,3}$	$\frac{1}{2,9}$	$\frac{15}{20,3}$	$\frac{r}{-}$	$\frac{30}{28,8}$	$\frac{1}{8,3}$	$\frac{33}{22,0}$	$\frac{2,2}{0,4}$
Ежевика скальная	$\frac{35}{14,1}$	$\frac{\pm}{6,1}$	–	–	–	–	–	–	–	–	$\frac{7}{14,1}$	$\frac{1,2}{0,2}$
Запас надземной фитомассы разнотравья	–	82,5	–	48,2	–	73,8	–	97,5	–	71,4	–	$\frac{74,7}{13,0}$
Итого запаса надземной фитомассы	–	406,9	–	551,4	–	538,5	–	502,6	–	872,2	–	$\frac{574,3}{100,0}$

Примечание. V – встречаемость, %; H – средняя высота, см; A – обилие по шкале Браун-Бланке (r – вид чрезвычайно редок с незначительным покрытием); + – вид встречается редко, степень покрытия мала; 1 – количество особей велико, степень покрытия мала или особей мало, но покрытие большое; 2 – количество особей велико, проективное покрытие 5–25 %; 3 – число особей любое, проективное покрытие 25–50 %; 4 – число особей любое, проективное покрытие 50–75 %); M – запас абсолютно сухой надземной фитомассы, кг/га; M (%) – то же в процентах от общего.

Наибольшей встречаемостью (61 %) выделялся вербейник обыкновенный. У ежевики сизой, череды олиственной и крапивы двудомной этот показатель находился на уровне 58–60 %. Высокая встречаемость (43 %) отмечена у герани Роберта. Частота встречаемости 6 видов составляла 21–40 %, еще 6 – 11–20 %, 27 – 1–10 %.

Запас надземной фитомассы НЯР формируют 18 видов растений, суммарно аккумулирующие 87 % общей органической массы яруса. Почти половина ее (58,4 %) приходится на 4 вида растений (луговик дернистый, череда олиственная, ежевика сизая и тростник обыкновенный), четвертая часть (25,5 %) – на 8 видов (крапива двудомная, касатик ложноаировый, зюзник европейский, осоки ложносытевую, пузырчатую и пепельно-серую, щитовник шартрский и вейник седеющий), 3,1 % – на остальные 6 видов (табл. 5).

На прочие 26 видов (29,9 % от общего их количества в типе леса), представляющие «разнотравье», приходится 13 % ЗНФ НЯР с вариацией по насаждениям от 8,2 до 19,4 % (табл. 6).

Таблица 6

Характеристика разнотравья

Table 6

Characteristics of various grasses

Шифр ВПП	Количество видов			Надземная фитомасса разнотравья, %
	всего	в том числе разнотравья		
		штук	%	
Нп9-11	19	11	57,9	17,9
Нп10-26	6	3	50,0	8,7
Нп77-16	23	15	65,2	13,7
Б611-20	23	15	65,2	19,4
Нп77-29	27	18	66,7	8,2
В типе леса	44	26	59,9	13,0

Морфометрические характеристики отдельных видов НЯР в значительной мере определяют их обилие и влияют на накопление надземной фитомассы [3; 5]. В черноольшанике папоротниковом крупные виды НЯР характеризуются, как правило, более высоким обилием. Поэтому на 3 высокорослых вида (череда олиственная, тростник обыкновенный и касатик ложноаировый) приходится 26,4 % ЗНФ (табл. 5).

В соответствии с [35] установлено, что из 18 основных видов НЯР в верхнем подъярусе (60 см и выше) располагаются 7 видов растений средней высотой 91,4 см с дифференциацией по видам от 60,2 до 178,6 см, на которые приходится 59,7 % общего ЗНФ. Средний подъярус (30–60 см) представлен 4 видами средней высотой 44,4 см и колебанием высот отдельных видов в диапазоне 30,9–59,0 см, в котором содержится 17,8 % надземной фитомассы яруса. В нижнем подъярусе (до 30 см), состоящем из 7 видов средней высотой 25,6 (21,0–30,0) см, депонировано 9,5 % сухого органического вещества.

Влияние внешних факторов на ЗНФ и ОПП НЯР. Высокая пространственная неоднородность и изменчивость ценотических характеристик НЯР в насаждениях черноольшаника папоротникового обусловлена влиянием внешних экологических факторов, за исключением прямого антропогенного воздействия по причине отсутствия хозяйственной деятельности в течение 37 лет из-за высокого радиоактивного загрязнения местности. В лесных фитоценозах ведущим фактором, лимитирующим рост и развитие НЯР, является освещенность его поверхности, которая зависит от характеристик древесного и подростово-подлесочного ярусов насаждений.

Древостой. Наибольшее влияние на ценотические характеристики НЯР оказывают полнота и породный состав древостоев, определяющие сомкнутость древесного полога и регулирующие поступление под него тепла, света и влаги [14–19]. Ольха черная – средне светолюбивая порода [36]. Протяженности крон ее высоковозрастных насаждений составляет 35 % [26]. Под их пологом обеспечиваются вполне приемлемые условия для роста и развития нижних ярусов растительности [37]. Наличие теневыносливых пород в составе древостоев способствует снижению ОПП НЯР [3].

Исследуемые древостои черноольшаника папоротникового (табл. 1) по основным таксационным показателям близки к нормальным насаждениям [27]. В насаждениях с единичным участием в составе других древесных пород ОПП НЯР составляет 83–90 %, а в древостоях с 10 % долей березы и единичной примесью дуба и ясеня – 48–55 % (табл. 2 и 7). Однако эта доля примеси в составе древостоев вряд ли

оказывает значимое влияние на ОПП. Существенной разницы в ЗНФ НЯР между этими насаждениями не наблюдается.

Установлены незначимые ($p > 0,05$) средние и высокие корреляции Пирсона, умеренные и средние корреляции Спирмена ОПП НЯР с таксационными показателями древостоев. Очевидно, что наибольшее влияние на ОПП НЯР оказывает их густота, очень тесно коррелирующая с возрастом (r -Пирсона = $-0,96$). Вероятно поэтому наиболее низкое покрытие почвы травяным покровом наблюдается в самом густом насаждении наименьшего возраста (ВПП Нп9-11). Связи ЗНФ с таксационными характеристиками древостоя не выявлены (табл. 7).

Таблица 7

Коэффициенты корреляции Пирсона (числитель)/Спирмена (знаменатель) показателей нижних ярусов растительности и древостоя ($n = 5$)

Table 7

Pearson (numerator)/Spearman (denominator) correlation coefficients of lower tiers of vegetation and forest stand ($n = 5$)

Показатели	Таксационные показатели древостоев						
	Возраст, лет	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Густота, шт./га	Сумма площадей сечений, м ² /га	Полнота	Запас, м ³ /га
Проективное покрытие, %	0,66/0,30	0,57/0,30	0,70/0,60	-0,74/-0,30	0,63/0,50	0,67/0,50	0,67/0,60
Запас фитомассы, кг/га	0,11/0,10	-0,16/0,10	0,15/0,20	-0,35/-0,10	-0,02/-0,10	0,0/-0,10	-0,05/0,20

Подрост и подлесок существенно снижают ОПП [3] и ЗНФ [38] НЯР в лесных сообществах через конкурентные взаимоотношения и ухудшение светового довольствия. В исследованных насаждениях подрост редкий в основном крупный; густота подлеска варьирует от редкого до очень густого при высоте 0,8–1,8 м (табл. 8). В насаждениях с наибольшим суммарным количеством подроста и подлеска (ВПП Нп9-11 и Нп10-26) наблюдаются наименьшие показатели ОПП (табл. 2).

Таблица 8

Характеристика подроста и подлеска

Table 8

Characteristics of undergrowth and underforest

Элемент фитоценоза	Характеристики	На временных пробных площадях					В типе леса
		Нп9-11	Нп10-26	Нп77-16	Бб11-20	Нп77-29	
Подрост	Общая густота, шт./га	1440	1520	960	560	400	976
	Средняя высота, м	2,31	1,59	0,69	2,33	1,98	1,78
Подлесок	Общая густота, шт./га	5840	30000	1680	5760	1840	9024
	Средняя высота, м	1,24	1,39	1,51	0,78	1,81	1,34

Установлена обратная средняя ($r = -0,65$) незначимая ($p > 0,05$) корреляция Пирсона густоты подроста с ЗНФ НЯР и очень высокая ($r = -0,94$) значимая ($p < 0,05$) – с ОПП. Густота подлеска незначимо коррелирует с ОПП НЯР ($r = -0,58$) и абсолютно не связана с запасом его фитомассы ($r = -0,19$). Суммарная густота подроста и подлеска имеет среднюю связь с ОПП НЯР ($r = -0,60$) и абсолютно не влияет на запас фитомассы ($r = -0,21$). Полученные зависимости и сопоставление данных табл. 2 и 8 свидетельствуют о существенном влиянии подроста и подлеска на ОПП НЯР и малозначимом – на их ЗНФ.

Эдафические условия для типа леса априори являются константными. Черноольшаник папоротниковоый характеризуется типом лесорастительных условий C_4 [26]. В Полесье его насаждения локализованы в понижениях и оторфованных ложбинах со среднеобводненными слабодренированными торфянисто-тофяно-глеевыми, торфяными маломощными почвами [4].

Исследованные насаждения различаются по водообеспеченности и водному режиму почв, что обусловлено последствиями осушительной мелиорации и приуроченностью их к различным геоморфологическим структурам. Так, в 1950–1980-е гг. было осушено 85 тыс. га, или 39,3 % современной территории заповедника [39] с образованием густой (1,1 км/км²) гидрографической сети, что привело к устойчивому понижению уровней грунтовых вод и нарушению их режимов на сопредельных территориях, в том числе

и в черноольшаниках. Насаждения ВПП Нп9-11 и Нп10-26 расположены на переходе Хойникской водно-ледниковой равнины к долине р. Припять и характеризуются несколько повышенным местоположением по рельефу и нахождением в зоне осушительной сети (0,8 и 1,1 км до ближайшего канала). Согласно исследованиям [40], ее влияние на уровни грунтовых вод сопредельных территорий может достигать 4–5 км и более. Поэтому в этих насаждениях происходит более ранний спад талых поверхностных и более быстрое опускание уровней грунтовых вод.

Ниже по рельефу находятся насаждения ВПП Нп77-16, Бб11-20 и Нп77-29, приуроченные к понижениям второй надпойменной террасы р. Припять. Их пониженное местоположение, сливание подземных вод различных толщ в единый горизонт безнапорных вод в пределах надпойменных террас Припяти [41] и нахождение вне зоны влияния гидромелиоративной сети обеспечивают более длительное стояние талых вод на поверхности почвы и медленное их снижение со временем.

Погодно-климатические условия. Обводненность почв в черноольшаниках определяют грунтовые воды. В черноольшанике касатиковом, близком по лесорастительным условиям к черноольшанику папоротниковому [34], их уровни в годовых циклах формируют атмосферные осадки, а пополнение происходит в осенне-зимний и весенний периоды [1].

В заповеднике в 2014–2022 гг. в сравнении с предыдущим периодом (1997–2012 гг.) существенно выросла средняя температура воздуха и на 25 % уменьшился коэффициент увлажнения территории (табл. 9). За это время в черноольшаниках папоротниковых произошла сильная сработка запасов грунтовых вод и устойчивое опускание их уровней; поверхность почв практически не затапливалась, летом и осенью наблюдалось иссушение верхних ее слоев.

Таблица 9

Показатели тепло- и влагообеспеченности территории

Table 9

Indicators of heat and moisture availability of the territory

Период, год, месяц	Метеорологические показатели		
	средняя температура воздуха, °С	количество осадков, мм	коэффициент увлажнения территории (по Иванову)
1997–2012 [по 42])	7,8	609	1,05
2014–2022	8,8	586	0,79
2022	8,4	698	0,87
VIII 2022–VII 2023	9,9	554	0,84
В том числе:			
VIII 2022	21,3	24	0,19
IX 2022	11,2	139	3,30
X 2022	9,3	95	2,59
XI 2022	2,5	54	3,83
XII 2022	–1,7	56	4,46
I 2023	–0,7	21	1,45
II 2023	–1,4	26	1,27
III 2023	3,6	50	1,33
IV 2023	9,6	37	0,59
V 2023	14,6	6	0,05
VI 2023	18,7	42	0,39
VII 2023	20,0	62	0,64
IX 2022–VII 2023	7,8	673	1,20
VIII 2022–IV 2023	6,0	502	1,42
Вегетационный период (V–VII 2023)	18,9	72	0,21

Примечание. За 1997–2021 гг. данные научно-исследовательской станции «Масаны» заповедника, 2022 и 2023 гг. – метеостанции «Брагин» Белгидромета.

Известно [20; 21], что ЗНФ и ОПП НЯР определяет погода текущего вегетационного периода и предыдущего года. Предшествовавший исследованиям 2022 г. и период с VIII 2022 по VII 2023 гг. были теплыми с повышенным увлажнением территории в сравнении с 2014–2022 гг. За сентябрь–ноябрь 2022 г. выпало 52 % осадков, до начала вегетации (за VIII 2022–IV 2023 гг.) – 92 % от общего за анализируемое время (табл. 9). Большое количество поступившей с сентября по март атмосферной влаги при отрицательных зимних температурах обеспечили накопление значительного запаса влаги в черноольшаниках. Весной 2023 г. в насаждениях папоротникового типа леса восстановились запасы грунтовых вод, поднялись их уровни, произошло весеннее затопление поверхности почвы. Дефицит почвенной влаги, образовавшийся за время многолетней засухи, был устранен. Несмотря на теплый и сухой вегетационный период года исследований (табл. 9), почва все лето была перенасыщена влагой.

На ВПП Нп77-16, Бб11-20 и Нп77-29 поверхностные воды в нанопонижениях стояли до конца июля – начала августа, верхние слои почвы были переувлажнены. И если в 2020 г. в составе флоры НЯР черноольшаника папоротникового преобладали мезофитные виды растений [33], то в 2023 г. были зарегистрированы влаголюбивые виды – горец земноводный, звездчатка болотная, камыш лесной, окопник лекарственный, частуха подорожниковая, чистец болотный, поручейник широколистный. Наблюдалась задержка в росте и развитии весьма распространенного в последние годы в типе леса мезофитного вида – крапивы двудомной. Ее средняя высота на конец июля – начало августа составляла в среднем 27,4 см, что отразилось на небольшой ее доле в составе ЗНФ яруса (4,9 %). В то же время широко расселился мезогигрофит чередолистная (табл. 5). Так, в 2024 г. по глазомерной оценке ее проективное покрытие на ВПП Нп77-29 составляло 90–95 %.

На ВПП Нп9-11 и Нп10-26 погодные условия меньше отразились на режиме грунтовых вод. Из-за повышенного местоположения и относительной близости осушительной сети вода с поверхности почвы в них ушла раньше. Видовой состав НЯР в этих насаждениях более бедный. Основную часть фитомассы в них формируют луговик дернистый, осоки и разнотравье (табл. 5). Колебание микрорельефа и наличие мочажин на ВПП Нп9-11 стало одной из причин пространственного различия видового состава растений и низких показателей ЗНФ и ОПП НЯР в насаждении.

Степень взаимовключения списков флоры НЯР черноольшаника папоротникового 2020 и 2023 гг. составляет 78,1 %, коэффициент сходства флоры этих лет (по Жаккару) – 0,48, индекс Чекановского – Сьеренсена – 0,66, что указывает на существенное изменение их видового состава.

Зоологический фактор. На ВПП Нп9-11 и Нп10-26 произошло снижение ОПП и ЗНФ НЯР по причине существенной «выбитости» травяной растительности на многочисленных тропах диких копытных животных, которые включались в УП.

Как следует из вышеизложенного, в каждом насаждении ЗНФ и ОПП НЯР определяет конкретная группа экологических факторов.

Заключение

Запас абсолютно сухой надземной фитомассы НЯР в высоковозрастных черноольшаниках папоротниковых ЗО ЧАЭС, расположенной на юго-востоке Белорусского Полесья, в условиях отсутствия прямого антропогенного влияния составляет в среднем 574 кг/га, ОПП – 72 %. Оба показателя характеризуются высокой пространственной вариабельностью. Между ними наблюдается средняя корреляционная связь.

Видовой состав НЯР небогат, изменчив в пространстве и времени. Доминируют вредоносный инвазионный вид чередолистная и аборигенный нитрофил крапива двудомная, или несколько видов содоминируют в разных сочетаниях.

Основной ЗНФ НЯР в типе леса (87 %) формируют 18 (41 % от общего количества) видов растений. Большую его часть (58,4 %) содержат 4 вида, в том числе 3 высокорослых (26,4 %), четвертую часть – 8 видов и 3,1 % – 6. На 26 видов группы «разнотравье» приходится 13,0 % общей надземной фитомассы. Растения верхнего подъяруса НЯР формируют 59,7 % общего ЗНФ, среднего – 17,8, нижнего – 9,5 %.

ЗНФ и ОПП НЯР, их изменчивость и пространственное распределение в насаждениях обусловлены влиянием комплекса взаимосвязанных экологических факторов. Наиболее значимыми являются породный состав и густота древостоя, густота подроста и подлеска, эдафические и погодно-климатические условия, близость объектов осушительной сети, присутствие диких копытных. При сходных лесорастительных условиях и близких по силе внешних воздействиях существенную роль в формировании ОПП и накоплении ЗНФ играют видовой состав, обилие, встречаемость и размеры преобладающих видов НЯР.

Библиографические ссылки

1. Бойко АВ, Смольский НВ, Сидорович ЕА, Евсевич КМ, Лознуха ИВ, Арабей НМ, Кирковский КК, Суровая ТП, Счастный АК. *Экспериментальные исследования ландшафтов Припятского заповедника*. Минск: Наука и техника; 1976. 304 с.
2. Пехота АП, Мижуй СМ, Бруй ДВ. Продуктивность живого напочвенного покрова лиственных лесов республиканского заказника «Стрельский». *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2021;81:274–281.
3. Углынец АВ, Шумак СВ, Гарбарук ДК. Запас надземной фитомассы и ценотическая характеристика живого напочвенного покрова черноольшаника сныгтевого в зоне отчуждения Чернобыльской атомной электростанции. *Труды БГТУ. Серия 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2024;2(282):56–66. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-7.
4. Юркевич ИД, Ловчий НФ, Гельтман ВС. *Леса Белорусского Полесья (геоботанические исследования)*. Минск: Наука и техника; 1977. 288 с.
5. Ермолова ЛС. Подходы к определению фитомассы напочвенного покрова в лесу (обзор методов). *Растительные ресурсы*. 2022;58(2):197–216. DOI: 10.31857/S0033994622020054.
6. Ипатов ВС. О корреляции между проективным покрытием и весом травянистых растений. *Ботанический журнал*. 1962;XLVII:991–992.
7. Трофимова ИЛ, Шевелина ИВ, Нагимов ЗЯ, Алиева ТМ. Фитомасса живого напочвенного покрова в сосняках зеленой зоны г. Екатеринбург. *Современные проблемы науки и образования* [Интернет, процитировано 01 ноября 2024]. 2014;1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12075>.
8. Пристова ТА. Динамика надземной фитомассы живого напочвенного покрова в лиственных фитоценозах послерубочного происхождения. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2019;2(2):204–209.
9. Ипатов ВС, Мирин ДМ. *Описание фитоценоза*. Санкт-Петербург: СПбГУ; 2008. 70 с.
10. Воронов АГ. *Геоботаника*. Москва: Высшая школа; 1973. 384 с.
11. Ярошенко ПД. *Геоботаника*. Москва: Просвещение; 1969. 200 с.
12. Козьяков СН, Козьяков АС, Кональчук ВК. Определение запасов сырья полезных растений методом фотоплощадок. *Растительные ресурсы*. 1984;20(4):569–572.
13. Бузук ГН. Определение проективного покрытия и урожайности при использовании фототочек (photo point method). *Вестник фармации*. 2013;3:74–80.
14. Банникова ИА. *Влияние древесной и кустарниковой растительности на развитие нижних ярусов лесных биогеоценозов*. Москва: Наука; 1967. 103 с.
15. Власова НА. *Фитомасса и пространственное распределение живого напочвенного покрова сосняков зеленомошной группы типов леса Марийского Заволжья* [автореферат диссертации]. Йошкар-Ола: МарГТУ; 2007. 25 с.
16. Лебедева ВХ, Тиходеева МЮ, Ипатов ВС. Влияние деревьев на напочвенный покров в осиннике черничном. *Ботанический журнал*. 2008;93(7):996–1010.
17. Ковылина ОП, Ковылин НВ, Сухенко НВ. Исследование роста защитных лесных полос разного видового состава в Ширинской степи Хакасии. *Хвойные бореальной зоны*. 2011;XXVIII(1–2):27–33.
18. Гончарова ИА, Кириенко МА. Структура живого напочвенного покрова под пологом различных древесных видов в дендрарии Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН. *Сибирский лесной журнал*. 2023;5:75–82.
19. Малиновских АА. Влияние уровня освещенности под пологом леса на урожайность брусники в условиях Средне-Обского бора Алтайского края. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2016;4(138):105–109.
20. Жуйкова ВА, Жуйкова ТВ, Мелинг ЭВ. Изучение надземной фитомассы луговых сообществ при сочетанном действии химического загрязнения и погодно-климатических факторов. В: *Антропогенная трансформация природной среды. Материалы Международной конференции, г. Пермь, 18–21 октября 2010 г.* Пермь: Пермский государственный университет; 2010;1(1):287–293.
21. Николаева СА, Климова НВ. Сезонная динамика травяного яруса лиственно-сосновых травяных сообществ в пригородных лесах г. Томска. *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2010;1(9):78–92.
22. Логинов ВФ, Лысенко СА, Мельник ВИ. *Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования*. Минск: Энциклопедикс; 2020. 264 с.
23. Бровка ЮА, Буяков ИВ. Изменение гидротермического коэффициента и повторяемости экстремальных условий увлажнения на территории Беларуси в период потепления климата. *Природопользование*. 2020;2:5–18. DOI: 10.47612/2079-3928-2020-2-5-18.
24. Лиштван ИИ, Горбутович ГД, Ярошевич ЛМ. Охрана окружающей среды в связи с мелнирацией Полесской низменности. *Проблемы Полесья*. 1987;11:3–10.
25. Шумак СВ, Турчин ЛМ. Анализ ценофлоры живого напочвенного покрова в типе леса черноольшаник папоротниковый в Полесском государственном радиационно-экологическом заповеднике. *Ботаника (исследования)*. 2024;54:144–150.
26. Юркевич ИД, Гельтман ВС, Ловчий НФ. *Типы и ассоциации черноольховых лесов (По исследованиям в БССР)*. Минск: Наука и техника; 1968. 376 с.
27. Кузьменков МВ, Кулагин АП, Таркан АВ, Бузуновский РС. *Таксационно-лесостроительный справочник*. Минск: Лесное и охотничье хозяйство; 2019. 335 с.
28. Сауткина ТА, Третьяков ДИ, Зубкевич ГИ, Козловская НВ, Парфенов ВИ, Блажевич РЮ, Скуратович АН, Дмитриева СА, Семеренко ЛВ, Симонович ЛГ, Швец ИВ, Млынарчик МП, Яковлева ИМ, Вынаев ГВ, Джус МА, Тихомиров ВН, Дубовик ДВ, Мазан ИФ, Побирущко ВФ. *Определитель высших растений Беларуси*. Минск: Дизайн ПРО; 1999. 472 с.
29. Браун Д. *Методы исследования и учета растительности*. Москва: Издательство иностранной литературы; 1957. 316 с.
30. Родин ЛЕ, Ремезов НП, Базилевич НИ. *Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах*. Ленинград: Наука; 1967. 145 с.
31. Базилевич НИ, Титлянова АА, Смирнов ВВ, Родин ЛЕ, Нечаева НТ, Левин ФИ. *Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах*. Москва: Мысль; 1978. 184 с.
32. Бунькова НП, Залесов СВ, Залесова ЕС, Магасумова АГ, Осипенко РА. *Основы фитомониторинга*. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет; 2020. 90 с.

33. Шумак СВ, Углынец АВ. Современный живой напочвенный покров в черноольшаниках Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. *Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. Естественные науки*. 2022;6(135):66–71.
34. Юркевич ИД. *Выделение типов леса при лесоустроительных работах*. Минск: Наука и техника; 1980. 120 с.
35. Шенников АП. *Введение в геоботанику*. Ленинград: Издательство ЛГУ; 1964. 447 с.
36. Иванов АФ. *Биология древесных растений*. Минск: Наука и техника; 1975. 264 с.
37. Кудин МВ, Углынец АВ, Гарбарук ДК. Предварительное естественное возобновление леса в высоковозрастных черноольшаниках зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. *Труды БГТУ. Серия 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2017;2(198):64–72.
38. Саевич КФ. Влияние подроста и подлеска на фитомассу живого напочвенного покрова. *Лесоведение и лесное хозяйство*. 1986;21:38–40.
39. Кудин МВ. Современное состояние сосновых лесов белорусского сектора зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. *Проблемы лесоведения и лесоводства*. 2015;75:468–479.
40. Смольский НВ. *Комплексные экспериментальные исследования ландшафтов Белоруссии*. Минск: Наука и техника; 1973. 312 с.
41. Лавров АП, Фадеева МВ, Сачок ГИ, Ваховский АП. Особенности формирования режима подземных вод и его прогноз. *Проблемы Полесья*. 1973;2:14–54.
42. Марченко ЮД. Погодно-климатические условия в ближней зоне Чернобыльской АЭС. *Экосистемы и радиация: аспекты существования и развития*. 2013;2:32–45.

References

1. Boiko AV, Smol'skii NV, Sidorovich EA, Evsievich KM, Loznukho IV, Arabei NM, Kirkovskii KK, Surovaya TP, Schastnyi AK. *Эксперименталь'nye issledovaniya landshaftov Pripyatskogo zapovednika* [Experimental studies of landscapes of the Pripyatsky Reserve]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1976. 304 p. Russian.
2. Pekhota AP, Mizhuy SM, Bruy DV. *Produktivnost' zhivogo napochvennogo pokrova listvennykh lesov respublikanskogo zakaznika «Strel'skii»* [Biological productivity of deciduous forests of the Republican Reserve «Strel'skiy»]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2021;81:274–281. Russian.
3. Uglyanets AV, Shumak SV, Garbaruk DK. *Zapas nadzemnoi fitomassy i tsenoticheskaya kharakteristika zhivogo napochvennogo pokrova chernool'shanika snytevogo v zone otchuzhdeniya Chernobyl'skoi atomnoi elektrostantsii* [The stock of aboveground phytomass and cenotic characteristics of the living ground cover of the goutweed Black alder forest type in the Chernobyl Nuclear Power Plant Exclusion Zone]. *Trudy BGTU. Seriya 1. Lesnoe khozyaistvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемых ресурсов*. 2024;2(282):56–66. Russian. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-7.
4. Yurkevich ID, Lovchii NF, Gel'tman VS. *Lesa Belorusskogo Poles'ya (geobotanicheskie issledovaniya)* [Forests of Belarusian Polesie (geobotanical studies)]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1977. 288 p. Russian.
5. Ermolova LS. *Podkhody k opredeleniyu fitomassy napochvennogo pokrova v lesu (obzor metodov)* [Approaches to the Assessment of the Forest Herbaceous Layer Phytomass (Methods Review)]. *Rastitel'nye resursy*. 2022;58(2):197–216. Russian. DOI: 10.31857/S0033994622020054.
6. Ipatov VS. *O korrelyatsii mezhdru proektivnym pokrytiem i vesom travyanistykh rastenii* [On the correlation between projective cover and weight of herbaceous plants]. *Botanicheskii zhurnal*. 1962;XLVII:991–992. Russian.
7. Trofimova IL, Shevelina IV, Nagimov ZYa, Alieva TM. *Fitomassa zhivogo napochvennogo pokrova v sosnyakakh zelenoi zony g. Ekaterinburga* [Phytomass of alive ground cover in pine forests of green space of Yekaterinburg]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Internet, cited 2024 November 01]. 2014;1. Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12075>.
8. Pristova TA. *Dinamika nadzemnoi fitomassy zhivogo napochvennogo pokrova v listvennykh fitotsenozakh poslerubochnogo proiskhozhdeniya* [Dynamics of phytomass of ground vegetation cover plants in post-harvest origin deciduous forests of the middle taiga]. *Izvestiya Samar'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2019;2(2):204–209. Russian.
9. Ipatov VS, Mirin DM. *Opisanie fitotsenoza* [Description of phytocenosis]. Saint Petersburg: SPbGU; 2008. 70 p. Russian.
10. Voronov AG. *Geobotanika* [Geobotany]. Moscow: Vysshaya shkola; 1973. 384 p. Russian.
11. Yaroshenko PD. *Geobotanika* [Geobotany]. Moscow: Prosveshchenie; 1969. 200 p. Russian.
12. Koz'yakov SN, Koz'yakov AS, Konoval'chuk VK. *Opredelenie zapasov syr'ya poleznykh rastenii metodom fotoploshchadok* [Determination of raw material stocks of useful plants using the photo-plot method]. *Rastitel'nye resursy*. 1984;20(4):569–572. Russian.
13. Buzuk GN. *Opredelenie proektivnogo pokrytiya i urozhainosti pri ispol'zovanii fototochek (photo point method)* [Determination of the projective cover and productivity when using photo points (photo points method)]. *Vestnik farmatsii*. 2013;3:74–80. Russian.
14. Bannikova IA. *Vliyanie drevesnoi i kustarnikovoii rastitel'nosti na razvitie nizhnikh yarusov lesnykh biogeotsenozov* [Influence of tree and shrub vegetation on the development of lower layers of forest biogeocenoses]. Moscow: Nauka; 1967. 103 p. Russian.
15. Vlasova NA. *Fitomassa i prostranstvennoe raspredelenie zhivogo napochvennogo pokrova sosnyakov zelenomoshnoi gruppy tipov lesa Mariiskogo Zavolzh'ya* [Phytomass and spatial distribution of living ground cover of pine forests of green-moss forest types of the Mari Volga region [PhD thesis]. Yoshkar-Ola: MarGTU; 2007. 25 p. Russian.
16. Lebedeva VKh, Tikhodeeva MYu, Ipatov VS. *Vliyanie derev'ev na napochvennyi pokrov v osinnike chernichnom* [The effect of the tree layer on the soil cover in the bilberry aspen forest]. *Botanicheskii zhurnal*. 2008;93(7):996–1010. Russian.
17. Kovylyna OP, Kovylin NV, Sukhenko NV. *Issledovanie rosta zashchitnykh lesnykh polos raznogo vidovogo sostava v Shirinskoi stepi Khakasii* [Study of the growth of protective forest belts of different species composition in the Shirinsky steppe of Khakassia]. *Khvoynye boreal'noi zony*. 2011;XXVIII(1–2):27–33. Russian.
18. Goncharova IA, Kirienco MA. *Struktura zhivogo napochvennogo pokrova pod pologom razlichnykh drevesnykh vidov v dendrarii Instituta lesa im. V. N. Sukacheva SO RAN* [The structure of living ground cover under the various tree species canopy in the arboretum of V. N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences]. *Sibirskii lesnoi zhurnal*. 2023;5:75–82. Russian.
19. Malinovskikh AA. *Vliyanie urovnya osveshchennosti pod pologom lesa na urozhainost' brusniki v usloviyakh Sredne-Ob'skogo bora Altaiskogo kraia* [The effect of illumination level under forest canopy on cowberry yield under the conditions of the Sredne-Ob'sky pine forest of the Altai Region]. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016;4(138):105–109. Russian.

20. Zhuykova VA, Zhuykova TV, Meling EV. *Izuchenie nadzemnoi fitomassy lugovykh soobshchestv pri sochetannom deistvii khimicheskogo zagryazneniya i pogodno-klimaticheskikh faktorov* [Study of aboveground phytomass of meadow communities under combined action of chemical pollution and weather-climatic factors]. In: *Antropogennaya transformatsiya prirodnoy sredy* [Anthropogenic transformation of the natural environment]. Perm: Permskii gosudarstvennyi universitet; 2010;1(1):287–293. Russian.
21. Nikolaeva SA, Klimova NV. *Sezonnaya dinamika travyanogo yarusa listvenno-sosnovykh travyanykh soobshchestv v prigorodnykh lesakh g. Tomsk* [Seasonal dynamics of herbaceous storey in deciduous-pine communities of forests near Tomsk]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*. 2010;1(9):78–92. Russian.
22. Loginov VF, Lysenko SA, Mel'nik VI. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, regulatory opportunities]. Minsk: Entsiklopediks; 2020. 264 p. Russian.
23. Brovka YuA, Buyakov IV. *Izmenenie gidrotermicheskogo koeffitsienta i povtoryaemosti ekstremal'nykh uslovii uvlazhneniya na territorii Belarusi v period potepeniya klimata* [Changes in the hydrothermal coefficient and in the frequency of extreme humidification conditions on the territory of Belarus during climate warming]. *Prirodopol'zovanie*. 2020;2:5–18. Russian. DOI: 10.47612/2079-3928-2020-2-5-18.
24. Lishvan II, Gorbutovich GD, Yaroshevich LM. *Okhrana okruzhayushchei sredy v svyazi s melioratsiei Polesskoi nizmennosti* [Environmental protection in connection with reclamation of the Poleskaya Lowland]. *Problemy Polesya*. 1987;11:3–10. Russian.
25. Shumak SV, Turchin LM. *Analiz tsenoflory zhivogo napochvennogo pokrova v tipe lesa chernool'shanik paporotnikovyyi v Polesskom gosudarstvennom radiatsionno-ekologicheskom zapovednike* [Analysis of the cenoflora of the black alder fern living ground cover in the Polesye State Radiation and Ecological Reserve]. *Botanika (issledovaniya)*. 2024;54:144–150. Russian.
26. Yurkevich ID, Gel'tman VS, Lovchii NF. *Tipy i assotsiatsii chernool'khovykh lesov (Po issledovaniyam v BSSR)* [Types and associations of black alder forests (Based on studies in BSSR)]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1968. 376 p. Russian.
27. Kuz'menkov MV, Kulagin AP, Tarkan AV, Buzunovskii RS. *Taksatsionno-lesoustroitel'nyy spravochnik* [Taxation and forest inventory guide]. Minsk: Lesnoye i okhotnich'ye khozyaystvo; 2019. 335 p. Russian.
28. Sautkina TI, Tretyakov DI, Zubrevich GI, Kozlovskaya NV, Parfenov VI, Blazhevich RYu, Skuratovich AN, Dmitrieva SA, Semerenko LV, Simonovich LG, Shvets IV, Mlynarchik MP, Yakovleva IM, Vynaev GV, Dzhus MA, Tikhomirov VN, Dubovik DV, Mazan IF, Pobirushko VF. *Opredelitel' vysshikh rasteniy Belarusi* [The definitive guide to the higher plants of Belarus]. Minsk: Dizayn PRO; 1999. 472 p. Russian.
29. Braun D. *Metody issledovaniya i ucheta rastitel'nosti* [Methods of surveying and measuring vegetation]. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoy literatury; 1957. 316 p. Russian.
30. Rodin LE, Remezov NP, Bazilevich NI. *Metodicheskie ukazaniya k izucheniyu dinamiki i biologicheskogo krugovorota v fitotsenozakh* [Methodological guidelines for the study of the dynamics and biological cycle in phytocenoses]. Leningrad: Nauka; 1967. 145 p. Russian.
31. Bazilevich NI, Titlyanova AA, Smirnov VV, Rodin LE, Nechaeva NT, Levin FI. *Metody izucheniya biologicheskogo krugovorota v razlichnykh prirodnykh zonakh* [Methods of studying the biological cycle in various natural areas]. Moscow: Mysl'; 1978. 184 p. Russian.
32. Bun'kova NP, Zalesov SV, Zalesova ES, Magasumova AG, Osipenko RA. *Osnovy fitomonitoringa* [Fundamentals of phytomonitoring]. Yekaterinburg: Uralskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskij universitet; 2020. 90 p. Russian.
33. Shumak SV, Uglyanets AV. *Sovremennyyi zhivoi napochvennyy pokrov v chernool'shanikakh Polesskogo gosudarstvennogo radiatsionno-ekologicheskogo zapovednika* [Modern living ground cover in black alder forests of the Polesky State Radiation and Ecological Reserve]. *Izvestiya Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta im. F. Skoriny. Estestvennye nauki*. 2022;6(135):66–71. Russian.
34. Yurkevich ID. *Vydelenie tipov lesa pri lesoustroitel'nykh rabotakh* [Identification of forest types in forest managements operations]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1980. 120 p. Russian.
35. Shennikov AP. *Vvedenie v geobotaniku* [Introduction to geobotany]. Leningrad: Izdatel'stvo LGU; 1964. 447 p. Russian.
36. Ivanov AF. *Biologiya drevnykh rasteniy* [Biology of woody plants]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1975. 264 p. Russian.
37. Kudin MV, Uglyanets AV, Garbaruk DK. *Predvaritel'noe estestvennoe vozobnovlenie lesa v vysokovozrastnykh chernool'shanikakh zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [Preliminary natural forest regeneration in overgrown black alder stands of the Chernobyl Exclusion Zone]. *Trudy BGTU. Seriya I. Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyayemykh resursov*. 2017;2(198):64–72. Russian.
38. Saevich KF. *Vliyaniye podrosta i podleska na fitomassu zhivogo napochvennogo pokrova* [Influence of undergrowth and underforest on phytomass of living ground cover]. *Lesovedeniye i lesnoe khozyaystvo*. 1986;21:38–40. Russian.
39. Kudin MV. *Sovremennoe sostoyaniye sosnovykh lesov belorusskogo sektora zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [Current state of pine forests of the belarusian sector in the exclusion zone of the Chernobyl NPS]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva*. 2015;75:468–479. Russian.
40. Smol'skii NV. *Kompleksnyye eksperimental'nye issledovaniya landshaftov Belorussii* [Integrated experimental studies of landscapes in Belarus]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1973. 312 p. Russian.
41. Lavrov AP, Fadeeva MV, Sachok GI, Vakhovskii AP. *Osobennosti formirovaniya rezhima podzemnykh vod i ego prognoz* [Peculiarities of groundwater regime formation and its forecast]. *Problemy Polesya*. 1973;2:14–54. Russian.
42. Marchenko YuD. *Pogodno-klimaticheskie usloviya v blizhnei zone Chernobyl'skoi AES* [Weather-climate conditions in the near zone of Chernobyl NPP]. *Ekosistemy i radiatsiya: aspekty sushchestvovaniya i razvitiya*. 2013;2:2–45. Russian.

Статья поступила в редколлегию 03.12.2024.
Received by editorial board 03.12.2024.

УДК 574.587+578.087(282.247.431.2)+595.7(476)2

ОБОБЩЕННЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ СМЕШАННЫЕ МОДЕЛИ (GLMM) В ИССЛЕДОВАНИЯХ ЭКОЛОГИИ СООБЩЕСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ R

Г. Г. СУШКО¹⁾, А. С. ТКАЧЁНОК¹⁾

¹⁾*Витебский государственный университет им. П. М. Машерова,
пр. Московский, 33, 210038, г. Витебск, Беларусь*

Анализ данных в экологии сообществ часто имеет определенные трудности, так как стандартные параметрические методы неприменимы вследствие того, что экологические данные редко соответствуют закону нормального распределения, отсутствуют линейные соотношения между переменными, может быть коллинеарность между объясняющими переменными и избыточная дисперсия в наборах данных. В предложенном исследовании рассматривается подход, основанный на применении обобщенных регрессионных моделей со смешанными эффектами (GLMM), который позволяет анализировать данные синэкологических исследований с учетом указанных сложностей, а также включать в анализ не только количественные, но и качественные предикторы. С использованием собственных результатов исследований ассамблей жуужелиц в нескольких типах лесов продемонстрированы этапы выполнения GLMM в статистической среде R. Предложен несложный программный код для GLMM, доступный для использования начинающим исследователям. Детально рассмотрен протокол разведочного анализа данных, обосновано использование соответствующих пакетов, включая lme4, performance, car и др.

Ключевые слова: экология сообществ; регрессионный анализ; GLMM; статистическая среда R.

GENERALIZED LINEAR MIXED MODELS (GLMM) IN COMMUNITY ECOLOGY STUDIES USING THE R STATISTICAL ENVIRONMENT

G. G. SUSHKO^a, A. S. TKACHENOK^a

^a*Vitebsk State University named after P. M. Masharov,
33 Moskovsky Avenue, Vitebsk 210038, Belarus
Corresponding author: G. G. Sushko (gennadis@rambler.ru)*

Data analysis in community ecology often has certain difficulties, since standard parametric methods are inapplicable due to the fact that ecological data rarely normal distributed, there are no linear relationships between variables, there may be collinearity between explanatory variables and overdispersion in data sets. The proposed article considers an approach based on the use of regression generalized linear mixed models (GLMM), which allows analyzing data from synecological studies taking into account the above difficulties, as well as including not only quantitative but also qualitative predictors in the analysis.

Образец цитирования:

Сушко ГГ, Ткачёнок АС. Обобщенные линейные смешанные модели (GLMM) в исследованиях экологии сообществ с использованием статистической среды R. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;1:37–47. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-37-47>

For citation:

Sushko GG, Tkachenok AS. Generalized linear mixed models (GLMM) in community ecology studies using the R statistical environment. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;1:37–47. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-37-47>

Авторы:

Геннадий Геннадьевич Сушко – доктор биологических наук, профессор; заведующий кафедрой экологии и географии.

Анастасия Сергеевна Ткачёнок – студентка, факультет химико-биологических и географических наук.

Authors:

Gennadi G. Sushko, doctor of science (biology), full professor; head of the department of ecology and geography.

gennadis@rambler.ru

Anastasia S. Tkachenok, student, faculty of chemical, biological and geographical sciences.

updown9700@gmail.com

Using our own results of studies of ground beetle assemblages in several types of forests, the stages of GLMM implementation in the R statistical environment are demonstrated. A simple program code for GLMM is proposed, available for use by novice researchers. The protocol for exploratory data analysis is considered in detail, the use of appropriate packages, including lme4, performance, car, etc. is justified.

Keywords: community ecology; regression analysis; GLMM; R statistical environment.

Введение

Одной из ключевых задач в исследованиях экологии сообществ является поиск факторов среды, оказывающих влияние на показатели структурной организации, видовой состав, число видов, обилие и др. В данном случае для формирования доказательной базы и обоснованных выводов требуются специфические методы анализа и статистической обработки данных. В наши дни, благодаря развитию компьютерной техники и программного обеспечения, инструментарий для аналитической обработки данных экологических исследований постоянно расширяется. В частности, в экологии все большее применение находят возможности статистической среды R, которая в последнее время является одной из наиболее динамично развивающихся платформ анализа данных, объединяет язык программирования высокого уровня и мощные библиотеки программных модулей для вычислительной и графической обработки данных [1].

Одним из методов оценки влияния факторов среды на различные параметры сообществ является регрессионный анализ. В общих чертах его можно охарактеризовать как сборный набор методов, который применяется для предсказания изменчивости переменной отклика (или зависимой переменной) в зависимости от вариации значений одной или более предсказывающих переменных (независимые, или объясняющие переменные) [2; 3]. Регрессионный анализ можно использовать для обнаружения независимых переменных, которые оказывают влияние на зависимую с целью описания типа взаимосвязи, а также для составления уравнения, позволяющего предсказать значения зависимой переменной по изменению значений независимых переменных [3]. В синэкологии под независимыми переменными понимают используемые биотические и абиотические факторы среды, которые могут быть как количественными (температура, влажность, концентрация химических веществ в воде, или почве), так и качественными (наличие или отсутствие признака, степень антропогенного воздействия) [4; 5]. Классификация методов регрессионного анализа достаточно обширна и ее детальное рассмотрение выходит за рамки данной публикации. Ознакомиться подробно с различными методами регрессионного анализа можно в специальной литературе [1; 3; 6; 7]. Чаще всего в русскоязычных научных публикациях по экологии можно увидеть анализ с использованием простой линейной регрессии, с помощью которой оценивается влияние одной переменной (объясняющей) на другую (переменная отклика). Однако для ряда исследований возникает необходимость выявить влияние комплекса факторов среды на зависимую переменную, например на число видов определенного таксона в местообитании или их спектре. В данном случае уместно использование таких типов анализа, как обобщенные линейные (generalized linear models, GLM) и смешанные модели множественной регрессии (generalized linear mixed models, GLMM) [8–10]. Эти модели имеют важное значение. Они получили широкое применение, так как экологические данные редко соответствуют закону нормального распределения, а анализируемые переменные не всегда характеризуются линейными зависимостями [8; 9]. Применение GLM и GLMM с использованием биномиальной, отрицательной биномиальной и пуассоновской регрессии дает возможность решать эти проблемы [8; 10]. Отдельно следует выделить смешанные модели множественной регрессии (GLMM), которые позволяют детализировать оценку влияния независимых переменных, благодаря возможности включения в модель фиксированных и случайных эффектов, а также как количественные, так и качественные (категориальные) переменные [8]. Это является несомненным достоинством GLMM (по сравнению с другими методами, для исследований экологии сообществ).

Случайные эффекты – это переменные, которые могут варьировать случайным образом, уровни которых определяются случайной выборкой из совокупности всех возможных уровней. Например, измерения выполнены в разное время, в разных точках пространства, до и после воздействия фактора и др. [8; 11]. Таким образом, одни и те же детали, произведенные на разных станках или выполненные разными мастерами, как правило, имеют некоторые различия. Точно также организмы из одной популяции будут иметь те или иные различия. Фиксированные эффекты – это переменные, которые являются предметом интереса исследователя, то есть независимые переменные, уровни которых он контролирует [8; 11]. Например, мы хотим выяснить, какие факторы среды влияют на параметры биоразнообразия в нескольких биотопах. Для этого сами выбираем биотопы для исследований. Следовательно, тип биотопа можно рассматривать как фиксированный эффект. Далее мы выполняем измерения абиотических факторов среды для оценки их воздействия на зависимую переменную, которые также относятся к фиксированным эффектам.

В то же время на один и тот же фактор можно посмотреть и как фиксированный и как случайный в зависимости от целей исследования. В частности, как уже сказано, биотоп можно рассматривать как фиксированный фактор, так как мы заинтересованы в том, чтобы сделать выводы об этих конкретных местах обитания. Случайный эффект наблюдается, когда данные включают случайную выборку из многих возможных уровней фактора. Важно то, что данные выборки (например, число видов, обилие и др.) из одного биотопа могут иметь некоторую корреляцию между собой (пространственная автокорреляция), поскольку выборки получены из локалитетов со сходными условиями окружающей среды. Даже если вас не интересует эффект каждого локалитета, где взята выборка, вы должны учитывать эту потенциальную корреляцию, чтобы сделать выводы о биотопах в целом. Следовательно, в таком случае биотоп следует рассматривать как случайный фактор. Переменные со случайным эффектом, как правило, являются качественными переменными (категориальными) [8; 9].

Нетрудно убедиться, что обобщенные линейные смешанные модели (GLMM) – это удобный инструмент для описания взаимосвязи между переменными в экологических исследованиях. В то же время в доступной русскоязычной литературе описания методик (протоколов) выполнения данного анализа крайне ограничены. Как показала практика, исследователи, связанные с анализом данных, ограничиваются в своей работе, как правило, средствами *Microsoft Office Excel* или недостаточно гибкой программы *Statistica*, тогда как статистическая среда R является по-настоящему интеллектуальной, гибкой и богатой методами [1]. В то же время для работы с R требуются навыки написания программного кода, что для многих биологов вызывает затруднение. В связи с этим цель данной работы – предоставить пример несложного программного кода в R для GLMM, а также ознакомить читателя с необходимыми этапами анализа и пакетами для их реализации.

Материалы и методы исследования

В качестве иллюстративного материала использованы результаты собственных исследований параметров биоразнообразия жужелиц в нескольких типах сосновых лесов в Белорусском Поозерье. В качестве переменных отклика были выбраны число видов и число особей в выборках (по 10 выборок в каждом биотопе). В качестве объясняющих переменных использованы: число видов высших сосудистых растений, высота травяно-кустарничкового яруса (см), проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса (%), проективное покрытие мохового яруса (%), проективное покрытие подстилки (%), pH, влажность гумусового слоя (%) (измерены на 10 площадках 1x1 м); количество деревьев, высота деревьев (м) (измерены на 10 площадках 10x10 м).

Для выполнения анализа использованы пакеты *factoextra*, *corrplot*, *Hmisc*, *lme4*, *MuMIn*, *performance* и *car* статистической среды R [12; 13].

Результаты исследования и их обсуждение

При подготовке таблицы данных следует учесть, что переменные должны быть расположены в столбцах, которые нужно обозначить латинскими буквами, сократив названия, а в строках приведены данные по выборкам. В нашем образце использованы следующие сокращения: S – число видов, N – число особей в выборке, Nvid – число видов высших сосудистых растений, Vysjt – высота травяно-кустарничкового яруса, Rokgr – проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса, Rokmoh – проективное покрытие мохового яруса, Rokpod – проективное покрытие подстилки, Kolder – количество деревьев, Vysder – высота деревьев, pH – водородный показатель, Vlag – влажность гумусового слоя. Отдельно поясним наполнение первых двух столбцов. *Habitat* – категориальная переменная, где каждая строка – это название типа леса, в котором получены выборки (*sos moss* – сосняк мшистый, *sos cher* – сосняк черничный). *Subarea* – категориальная переменная, где цифра в строке обозначает более точное место проведения исследований (это может быть подрегион в пределах региона, страта, синюзия в фитоценозе и др.). В частности, учеты, выполненные в лесу в одном регионе, обозначены номером 1, в другом – номером 2, в третьем – номером 3 (рис. 1). Назовем их условно подрегионами. Такая детализация нужна для снятия проблемы автокорреляции, которая может возникнуть, если точки учетов расположены близко. Если вы уверены, что пространственная автокорреляция не является проблемой, так как выборки получены в локалитетах на больших расстояниях, эту переменную можно не вводить. Сохраняем таблицу в формате *.csv* загружаем ее в RStudio, указав ее расположение: `demo<- read.csv («C:\Users\datapinefor.csv», header = T, sep = «;»)`. С помощью `view(demo)` убеждаемся, что она загружена правильно.

Анализ состоит из трех блоков: разведочный анализ данных, собственно построение GLMM и тестирование построенной модели. Каждый из этих блоков включает ряд этапов.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
1	Habitat	Subarea	S	N	Nvid	Vysjt	Pokrr	Pokmol	Pokpod	Kolder	Vysder	pH	Vlag	
2	sos moss		1	9	65	5	18	10	90	3	15	22	5.5	11.50
3	sos moss		1	11	88	9	14	17	78	5	9	20	5.8	12.00
4	sos moss		2	10	72	7	13	12	87	4	11	19	6.2	11.50
5	sos moss		2	11	69	9	16	10	86	3	9	10	5.8	12.00
6	sos moss		3	11	74	9	17	14	83	2	12	12	6.1	14.20
7	sos moss		3	12	59	10	12	8	88	3	15	20	5.5	16.30
8	sos moss		4	11	78	9	14	14	86	4	10	20	5.8	14.20
9	sos moss		4	9	83	6	16	16	75	4	11	19	6.1	11.00
10	sos moss		5	11	65	8	16	11	87	3	10	19	5.8	12.00
11	sos moss		5	10	77	7	15	13	82	2	12	14	6.1	11.00
12	sos cher		6	7	92	5	30	62	76	5	7	14	5.9	11.00
13	sos cher		6	10	87	7	27	59	62	6	8	16	6.4	16.20
14	sos cher		7	13	65	8	19	38	57	11	11	16	6.6	18.70
15	sos cher		7	19	76	10	24	54	86	7	9	19	6.4	21.30
16	sos cher		8	17	89	9	17	58	54	5	6	12	5.8	19.6
17	sos cher		8	11	64	7	21	43	63	4	9	21	5.9	17.5
18	sos cher		9	14	105	9	18	62	49	8	11	23	6.4	18.4
19	sos cher		9	9	76	6	27	52	64	5	10	18	6.6	14.8
20	sos cher		10	12	88	8	19	59	57	6	12	12	5.8	18.4
21	sos cher		10	10	97	8	24	61	57	7	10	10	6.1	17.5

Рис. 1. Фрагмент анализируемой таблицы данных

Fig. 1. Fragment of the analyzed data table

Преимущества GLMM для использования в экологии обусловлено тем, что не требуется предположений о нормальности распределения данных, линейных взаимоотношений зависимой и независимой переменной и однородности дисперсии. Основными этапами разведочного анализа являются проверка на выбросы, коллинеарность и чрезмерную дисперсию [14].

Проверка на выбросы. Причиной наличия выброса может быть ошибка ввода или наблюдение, которое имеет относительно большую или малую величину по сравнению с большинством других наблюдений. Графические инструменты, которые обычно используются для обнаружения выбросов – диаграммы рассеяния и диаграммы размаха (боксплоты) [14]. Ниже приведен код построения боксплотов для зависимых переменных – число видов и число особей в выборках.

```
demo<- read.csv("C:\\Users\\datapinefor.csv", header = T, sep = ";")
par(mfrow = c(1,2), mar = c(5,5,4,1))
boxplot(demo[,3:3], outpch = 16, outcol = "darkorange1", outcex = 1, boxwex = 0.45, boxlwd = 0.1, whisklwd = 2, whiskcol = c("orange4", "#0e598f"), xlab = "S")
boxplot(demo$N, outpch = 16, outcol = "darkorange1", outcex = 1, boxwex = 0.45, boxlwd = 0.1, whisklwd = 2, whiskcol = c("orange4", "#0e598f"), xlab = "N")
```

Для улучшения визуализации боксплота использована базовая графика с установкой параметров с помощью функции par() для выведения двух графиков на одну панель.

Как следует из рис. 2, переменная S характеризуется наличием двух выбросов. При детальном рассмотрении значений, соответствующих выбросам, убеждаемся, что это не ошибка ввода, а наблюдения с высокими значениями (в двух выборках число видов было выше, по сравнению с другими).

Проверка коллинеарности. Коллинеарность – это наличие корреляции между независимыми переменными. Если коллинеарность проигнорирована, то результаты анализа могут привести к неправильным и запутанным выводам. Например, все использованные независимые переменные будут иметь значимое влияние, хотя некоторые из них коррелируют между собой [14]. Поэтому логично, что ключевое влияние будет оказывать одна из двух или более переменных, которые скоррелированы. Выбрать наиболее важную из двух или более переменных задача не всегда простая. Для этого используют специальный коэффициент – фактор инфляции дисперсии (Variance Inflation Factor, VIF). Чем он выше для j-го предиктора, тем сильнее линейная связь между этим и остальными предикторами. При определенном значении VIF переменная исключается из модели. Есть разные мнения по поводу пороговых значений VIF. Чаще всего критическим считают значение VIF = 5, несколько реже VIF = 10 [14]. Функции для автоматического расчета VIF реализованы в нескольких пакетах для R. Одним из примеров таких функций является vif() из пакета car. Для проверки наличия коллинеарности на начальном этапе используют разные подходы. Чаще всего в их числе анализ главных компонент (PCA) и построение корреляционных матриц. Далее, в случае выявления коллинеарности, одна или несколько переменных удаляется из модели по значению VIF.

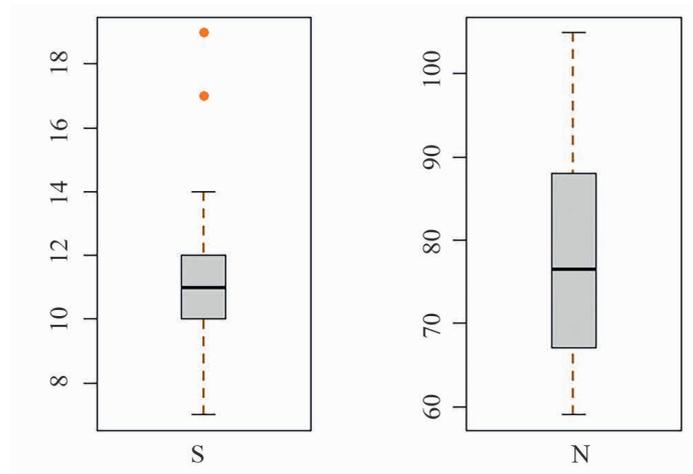


Рис. 2. Проверка на наличие выбросов переменных отклика

Fig. 2. Testing for outliers in response variables

Для выполнения PCA с помощью функции `prcomp()` используем следующий код:

```
demo<- read.csv("C:\\Users\\datapinefor.csv", header = T, sep = ";")
demodata<- demo[,5:ncol(demo)]
res.pca<- prcomp(demodata, scale = T)
print(res.pca)
summary(res.pca)
library(factoextra)
fviz_pca_var(res.pca, col.var = "green4")
```

Для улучшения визуализации биplotа использован пакет `factoextra` и функция этого пакета `fviz_pca_var()`.

Диаграмма ординации (рис. 3) демонстрирует коллинеарность некоторых переменных, так как соответствующие им вектора либо накладываются друг на друга, либо расположены рядом. Например, pH и проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса, количество деревьев и высота деревьев.

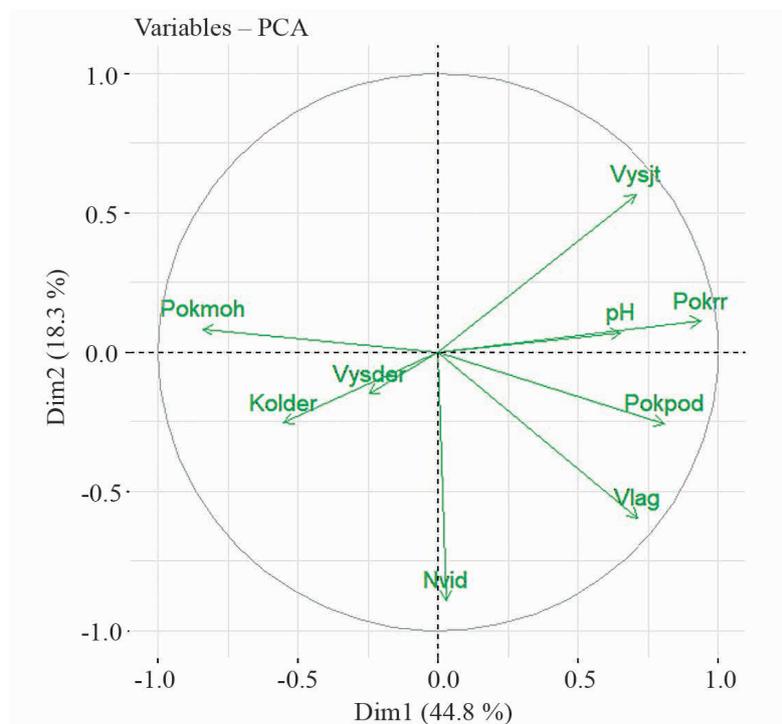


Рис. 3. Диаграмма PCA для проверки коллинеарности объясняющих переменных

Fig. 3. PCA diagram for testing collinearity of explanatory variables

Выполним корреляционный анализ, рассчитаем коэффициент корреляции Спирмена. Пары переменных, которые имеют корреляцию между собой, выберем при коэффициенте корреляции $R_s > 6$ [14].

Для построения корреляционной матрицы и ее визуализации (оставляем только статистически значимые коэффициенты корреляции, $p < 0.05$) с помощью пакетов Hmisc (расчет коэффициентов корреляции, применена функция `rcorr()` для вычисления коэффициента корреляции и его p -уровня) и `corrplot` (визуализация корреляционной матрицы) используем следующий код:

```
library(Hmisc)
library(corrplot)
demo <- read.csv("C:\\Users \\datapinefor.csv", header = T, sep = ";")
demodata <- demo[,5:ncol(demo)]
res2 <- rcorr(as.matrix(demodata), type = "spearman")
corrplot(res2$r, type="upper", order="hclust",
p.mat = res2$P, sig.level = 0.05, insig = "blank", addCoef.col = "black")
```

Анализируя корреляционную матрицу (рис. 4), нетрудно заметить, что среди переменных есть такие, которые имеют высокую значимую корреляцию. В частности, между Pokmoh и Pokrr ($r_s = -0.82$, $p < 0.05$), Pokmoh и Pokpod ($r_s = -0.70$, $p < 0.05$), Vlag и Pokpod ($r_s = 0.64$, $p < 0.05$) и др. Далее, в ходе подгонки модели будем принимать решение об исключении конкретных переменных с $VIF > 5$.

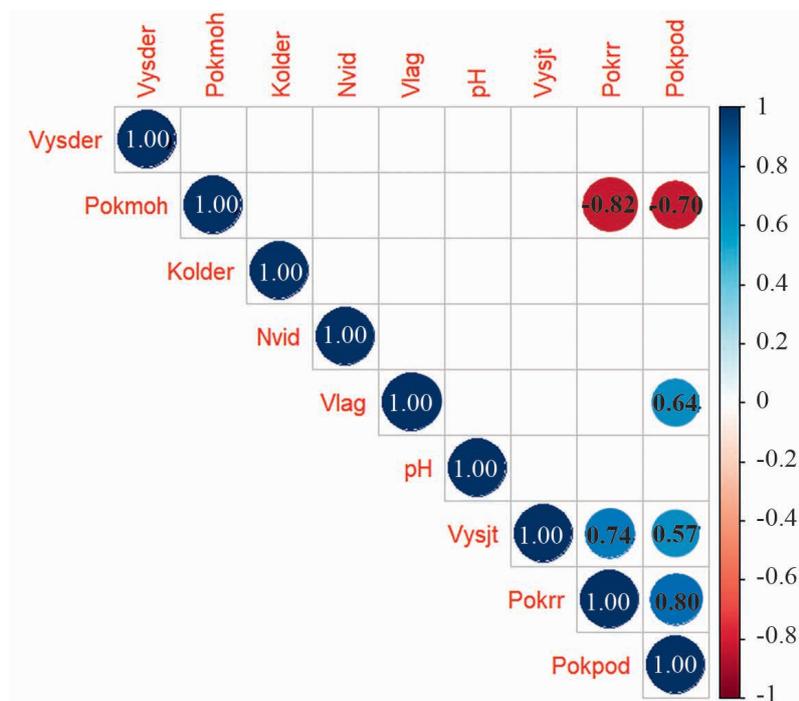


Рис. 4. Корреляционная матрица для проверки коллинеарности объясняющих переменных

Fig. 4. Correlation matrix for testing collinearity of explanatory variables

Следующим важным этапом разведочного анализа является проверка на наличие чрезмерной дисперсии (overdispersion). Такая дисперсия возникает в данных, если она превышает среднее значение. Чрезмерная дисперсия возникает еще и тогда, когда наблюдаемая дисперсия данных больше, чем предсказывает распределение Пуассона. При распределении Пуассона среднее значение и дисперсия равны, что может привести к занижению стандартных ошибок и неправильным выводам [8; 9]. Наличие чрезмерной дисперсии имеет значение для выбора типа распределения при построении модели. Во многих случаях, если данные не соответствуют закону нормального распределения, модели строят с распределением Пуассона, но только в случае отсутствия чрезмерной дисперсии. Если она выявлена, следует выбрать другой тип распределения, например, отрицательное биномиальное.

Данный этап совпадает с предварительной подгонкой модели с использованием всех переменных. Для построения GLMM используем пакет lme4, а для выявления чрезмерной дисперсии – пакет performance. Мы использовали также встроенную функцию пакета lme4, которая указывает количество итераций (прогонов или повторов выполнения модели) `glmer Control` [13]. Обратите внимание также и на то, что в модели добавлены два случайных фактора (1|Habitat) и (1|Subarea).

```
demo<- read.csv("C:\\Users\\ datapinefor.csv", header = T, sep = ";")
library(lme4)
model_global<- glmer(S ~ Nvid + Vysjt + Pokrr + Pokmoh + Pokpod + Kolder + Vysder + pH + Vlag +
(1|Habitat) + (1|Subarea), data = demo, family = poisson(),
glmerControl(optimizer = "bobyqa", optCtrl = list(maxfun = 100000)))
library(performance)
check_overdispersion(model_global)
```

Результаты проверки, которые приведены ниже, показали отсутствие чрезмерной дисперсии. Следовательно, использование распределения Пуассона здесь уместно.

```
>check_overdispersion(model_global)
```

```
Dispersion ratio = 0.116
```

```
Pearson's Chi-Squared = 0.928
```

```
p-value = 0.999
```

```
No overdispersion detected
```

Далее переходим к следующему блоку анализа – непосредственному построению модели. Первую модель построим для зависимой переменной – число видов (S). Вначале нужно определиться, какие независимые переменные следует оставить. Для расчета VIF используем пакет car. При этом в модели используем все имеющиеся независимые переменные.

```
demo<- read.csv("C:\\Users\\ datapinefor.csv", header = T, sep = ";")
```

```
library(lme4)
```

```
library(car)
```

```
model_S<-glmer(S ~ Nvid+Vysjt+Pokrr+Pokmoh+Pokpod+Kolder+Vysder+pH+Vlag+
```

```
(1|Habitat)+(1|Subarea), data = demo, family = poisson(), glmerControl(optimizer = "bobyqa", optCtrl =
list(maxfun = 100000)))
```

```
summary(model_S)
```

```
vif(model_S)
```

Получены следующие значения VIF:

```
Nvid Vysjt Pokrr Pokmoh Pokpod Kolder Vysder pH Vlag
```

```
4.071 7.23 14.52 5.80 3.23 1.67 1.32 2.20 6.13
```

Как видно, несколько переменных имеют значение VIF > 5. Уберем переменную с самым высоким значением VIF = 14.52 (Pokrr) и повторим анализ еще раз. Полученные результаты демонстрируют пороговое значение VIF = 5.08 для переменной Vlag, следовательно, ее также исключаем из модели. Теперь все независимые переменные имеют VIF > 5. Таким образом, в модель мы включаем следующие переменные: Nvid, Vysjt, Pokmoh, Pokpod, Kolder, Vysder и pH. Далее необходимо выполнить подгонку моделей и выбрать лучшую модель, используя различные сочетания независимых переменных. Такие сочетания строятся путем пошагового удаления или добавлений той или иной переменной для получения в итоге такого сочетания переменных, которое наилучшим образом сможет описать зависимости, если такие имеются.

Пакет MuMIn содержит функцию dredge(), которая осуществляет построение всех возможных вариантов моделей из различных комбинаций независимых переменных, включенных в изначальную полную модель [13]. Для оценивания моделей в данном случае используется информационный критерий Акаике (AICc) и показатель $\Delta AICc$. Лучшей считается та модель (gi), которая среди всех построенных моделей (Gr), имеет наименьшее значение AICc. Значение второго показателя, как правило, устанавливается в определенных пределах. В частности, для лучших моделей $\Delta AICc < 3$ [8; 9]. Еще один показатель, определяемый как нормированное значение силы обоснованности модели – это относительная вероятностная мера каждой модели gi в ансамбле из Gr моделей, или ее вес (weight). Найденные веса позволяют оценить относительную важность каждой независимой переменной как сумму весов тех моделей, в которых присутствует соответствующая независимая переменная. Все эти показатели включены в итоговую таблицу анализа. Теперь построим серию моделей с разными комбинациями независимых переменных используя функцию dredge() пакета MuMIn.

```
demo<- read.csv("C:\\Users\\ datapinefor.csv", header = T, sep = ";")
```

```
library(lme4)
```

```
library(MuMIn)
```

```
model_S_2 <- glmer(S ~ Nvid + Vysjt + Pokmoh + Pokpod + Kolder + Vysder + pH + (1|Habitat) +
(1|Subarea), data = demo, family = poisson(),
```

```
glmerControl(optimizer = "bobyqa", optCtrl = list(maxfun = 100000)))
```

```
options(na.action=na.fail)
dredge_S <- dredge(model_S_2)
```

Как показали результаты построения моделей, наилучшим является использование в итоговой модели одной переменной Nvid, так как она характеризуется наибольшим весом (0.287) и наименьшими значениями AICc (100.8) и ΔAICc (0.00) (рис. 5).

Model selection table												
(Intrc)	Koldr	Nvid	pH	Pokmh	Pokpd	vysdr	vysjt	df	logLik	AICc	delta	weight
1.4620		0.1220						4	-45.043	100.8	0.00	0.287
1.3500		0.1170			0.03057			5	-44.517	103.3	2.57	0.080
1.7310		0.1256		-0.00408				5	-44.681	103.6	2.90	0.067
0.4156		0.1263	0.16					5	-44.722	103.7	2.98	0.065
1.6770		0.1224						5	-44.801	103.9	3.14	0.060
1.1550		0.1363					0.010345	5	-44.810	103.9	3.15	0.059
1.3880		0.1223				0.00422		5	-45.010	104.3	3.55	0.049
2.4290								3	-48.492	104.5	3.73	0.044
2.2310					0.04004			4	-47.597	105.9	5.11	0.022
2.6850				-0.0034				4	-48.238	107.1	6.39	0.012

Рис. 5. Фрагмент таблицы выбора лучшей модели (скриншот RStudio)

Fig. 5. Fragment of the table for selecting the best model (screenshot RStudio)

Выполним анализ с использованием выявленного лучшего набора переменных (в нашем случае одной переменной) используя код:

```
best_model_S <- glmer(S ~ Nvid + (1|Habitat) + (1|Subarea), data = demo, family = poisson())
summary(best_model_S)
```

Получаем результаты, приведенные ниже.

Generalized linear mixed model fit by maximum likelihood (Laplace Approximation)

[‘glmer Mod’]

Family: poisson

Formula: S ~ Nvid + (1 | Habitat) + (1 | Subarea)

Data: demo

AIC BIC log Lik deviance df.resid

98.1 102.1 -45.0 90.1 16

Scaled residuals:

Min 1Q Median 3Q Max

-0.68369 -0.45586 -0.04234 0.27784 1.14744

Random effects:

Groups Name Variance Std.Dev.

Subarea (Intercept) 0.000e+00 0.000e+00

Habitat (Intercept) 1.776e-17 4.215e-09

Number of obs: 20, groups: Subarea, 10; Habitat, 2

Fixed effects:

Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)

(Intercept) 1.46202 0.38574 3.790 0.000151 ***

Nvid 0.12199 0.04719 2.585 0.009729 **

Signif. codes: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

Результаты демонстрируют значимую зависимость числа видов жужелиц ($p = 0,009$) от числа видов растений в местообитаниях. Экологическая интерпретация здесь вполне очевидна, так как с увеличением видового богатства растений, возрастает вероятность увеличения разнообразия фитофагов, которые могут быть жертвами большего числа видов жужелиц, которые являются преимущественно зоофагами.

Далее построим GLMM для переменной N (число особей в выборках), следуя этапам, охарактеризованным выше с целью демонстрации написания кода.

#загружаем в RStudio таблицу с нашими данными, загружаем пакет lme4 и указываем зависимую переменную (N) и через тильду все независимые переменные; указываем тип распределения (с начала распределение Пуассона)

```
demo<- read.csv(«C:\\Users\\datapinefor.csv», header = T, sep = «;»)
library(lme4)
model_global<- glmer(N ~ Nvid +Vysjt + Pokrr + Pokmoh + Pokpod + Kolder +Vysder + pH + Vlag +
(1|Habitat) + (1|Subarea), data = demo, family = poisson(), glmerControl(optimizer = “bobyqa”, optCtrl =
list(maxfun = 100000)))
#проверяем наличие избыточной дисперсии с помощью пакета performance
library(performance)
check_overdispersion(model_global)
#получаем результаты теста; как видно избыточная дисперсия не выявлена, следовательно, распреде-
ление Пуассона остается
Dispersion ratio = 0.774
Pearson’s Chi-Squared = 6.191 p-value = 0.626
No overdispersion detected.
#так как ранее PCA и корреляционный анализ показали наличие коллинеарности независимых перемен-
ных, удаляем из анализа те, которые имеют высокую корреляцию, с помощью пакета car и функции VIF().
library(car)
model_N<- glmer(N ~ Nvid +Vysjt + Pokrr +Pokmoh + Pokpod + Kolder +Vysder + pH + Vlag + (1|Habitat)
+ (1|Subarea), data = demo, family = poisson(), glmerControl(optimizer = “bobyqa”, optCtrl = list(maxfun =
100000)))
vif(model_N)
#результаты показали VIF > 5 для 4 переменных; удаляем переменные с наибольшим VIF
Nvid Vysjt Pokrr Pokmoh Pokpod Kolder Vysder pH Vlag
4.31 8.41 15.29 6.33 3.03 1.74 1.32 1.94 5.73
#повторяем тоже самое без переменной Pokrr
model_N_1 <- <- glmer(N ~ Nvid +Vysjt + Pokrr +Pokmoh + Pokpod + Kolder +Vysder + pH + Vlag +
(1|Habitat) + (1|Subarea), data = demo, family = poisson(), glmerControl(optimizer = “bobyqa”, optCtrl =
list(maxfun = 100000)))
vif(model_N_1)
#результаты показали VIF < 5 для всех переменных
Nvid Vysjt Pokmoh Pokpod Kolder Vysder pH Vlag
4.22 3.63 3.36 2.92 1.63 1.29 1.82 4.95
#строим серию моделей с разными комбинациями независимых переменных, используя функцию
dredge() пакета MuMIn
library(MuMIn)
options(na.action=na.fail)
dredge_N<- dredge(model_N_1)
dredge_N
#получаем таблицу результатов (рис. 6); наилучшим является использование в итоговой модели пере-
менных Nvid, Pokmoh, Vlag, так как эта модель характеризуется наибольшим весом (0.258) и наимень-
шими значениями AICc (158.5) и ΔAICc (0.00).
```

Model selection table													
(Intrc)	Koldr	Nvid	pH	Pokmh	Pokpd	Vysdr	Vysjt	Vlag	df	loglik	AICc	delta	weight
4.845		0.0002		-0.006634				0.0293	4	-73.919	158.5	0.00	0.258
4.974	-0.02006			-0.005577					5	-72.734	159.8	1.25	0.138
4.721		0.0002		-0.006042			0.0042		5	-73.623	161.5	3.03	0.057
4.897				-0.006407		-0.004			5	-73.718	161.7	3.22	0.052
4.708	-0.03390								4	-75.678	162.0	3.52	0.044
4.889				-0.007007	-0.0034				5	-73.895	162.1	3.57	0.043
4.876			-0.004	-0.006681					5	-73.917	162.1	3.62	0.042
4.847				-0.006634					5	-73.919	162.1	3.62	0.042
4.556	-0.02936				0.0215				5	-74.608	163.5	5.00	0.021
4.989	-0.01916			-0.005528		-0.001			6	-72.706	163.9	5.37	0.018
5.006	-0.01999			-0.005859	-0.0025				6	-72.722	163.9	5.40	0.017
5.068	-0.02018		-0.013	-0.005708					6	-72.723	163.9	5.40	0.017
4.945	-0.01912			-0.005516			0.0008		6	-72.727	163.9	5.41	0.017
4.962	-0.02022	0.0017		-0.005569					6	-72.731	163.9	5.42	0.017

Рис. 6. Фрагмент таблицы выбора лучшей модели (скриншот RStudio)

Fig. 6. Fragment of the table for selecting the best model (screenshot RStudio)

```
# выполняем анализ с использованием выявленного лучшего набора переменных
best_model_N<- glmer(N ~ Nvid + Pokmoh + Vlag + (1|Habitat) + (1|Subarea), data = demo, family =
poisson())
summary(best_model_N)
#получаем результаты
Generalized linear mixed model fit by maximum likelihood (Laplace Approximation) [‘glmerMod’]
Family: poisson
Formula: N ~ Nvid + Pokmoh + Vlag + (1 | Habitat) + (1 | Subarea)
Data: demo
AIC BIC logLik deviance df.resid
155.8 159.8 -73.9 147.8 16
Scaled residuals:
Min 1Q Median 3Q Max
-2.36661 -0.63351 0.09057 0.66928 1.73795
Random effects:
Groups Name Variance Std.Dev.
Subarea (Intercept) 0.000e 0.000e
Habitat (Intercept) 1.246e-12 2.417e-09
Number of obs: 20, groups: Subarea, 10; Habitat, 2
Fixed effects:
Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) 4.845016 0.135709 35.702 < 2e-16 ***
Nvid 0.13142 0.03737 2.483 0.003729 **
Pokmoh -0.006634 0.001849 -3.588 0.000333 ***
Vlag -0.034544 0.037667 -2.456 0.045479 *
---
Signif. codes: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

Результаты демонстрируют значимую зависимость числа особей жужелиц ($p < 0,05$) от числа видов растений в местообитаниях, проективного покрытия мохового яруса и влажности. Экологическая интерпретация зависимостей заключается в том, что с увеличением числа видов растений расширяется спектр фитофагов с ними связанных, что способствует расширению кормовой базы хищных жужелиц. С покрытием мохового яруса выявлена отрицательная зависимость. Можно предположить, что плотный моховый покров затрудняет перемещение жужелиц, которые передвигаются по поверхности почвы, так как большинство видов не способны летать. Отрицательная зависимость от режима увлажнения также вполне очевидна.

Заключение

Методология оценки влияния факторов среды на представителей различных таксонов, входящих в состав биотических сообществ, достаточно специфична, так как многие биоценотические показатели не соответствуют закону нормального распределения. Трансформация данных для их подгонки к нормальному распределению не всегда дает хорошие результаты. С другой стороны, во многих случаях исследователи ограничиваются в своей работе возможностями *Microsoft Office Excel* и *Statistica*, что крайне сужает спектр аналитических возможностей. В наши дни статистическая среда R является общепризнанным стандартом в научных публикациях в мире и мощным инструментом анализа данных. Однако у биологов возникает проблема с написанием программного кода. Несмотря на то что в последнее время появилось много литературы на русском языке по R, отдельные вопросы требуют более детального рассмотрения. В частности, методика построения обобщенных линейных смешанных моделей (GLMM), которые нашли широкое применение в экологических исследованиях. Предложенный программный код может стать полезным широкому кругу исследователей для анализа данных в области экологии сообществ, включая выявление зависимостей биоценотических показателей от биотических и биотических факторов среды, и формирования обоснованных выводов.

Библиографические ссылки

1. Шитиков ВК, Мастицкий СЭ. Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R. [Place unknown]: Электронная книга; 2017. 351 с.
2. Legendre P, Legendre L. Numerical Ecology. 3rd edition. Amsterdam: Elsevier Science. BV; 2012. 990 p.
3. Кабаков РИ. *R в действии. Анализ и визуализация данных в программе R*. Москва: ДМК Пресс; 2014. 580 с.
4. Borcard D, Gillet F, Legendre P. Numerical Ecology with R. Wien: Springer Nature; 2011. 319 p.
5. McCune B, Grace JB. Analysis of ecological communities. Glendon Beach: MjMSoftware Design; 2002. 304 p.
6. Мастицкий СЭ, Шитиков ВК. *Статистический анализ и визуализация данных с помощью R*. Москва: ДМК Пресс; 2015. 496 с.
7. Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd edition. New York: Springer; 2009. 745 p.
8. Zuur AF, Ieno EN, Walker N, Saveliev, AA, Smith GM. Mixed Effects Models and Extensions in Ecology With R. New York: Springer; 2009. 574 p.
9. Zuur AF, Ieno EN, Smith GM. Analyzing Ecological Data. New York: Springer; 2007. 672 p.
10. Faraway JJ. Extending the linear model with R: generalized linear, mixed effects and nonparametric regression models. Volume 124. Chapman & Hall/CRC Taylor & Francis Group; 2017. 331 p.
11. Четвериков АА, Линейные модели со смешанными эффектами в когнитивных исследованиях. *Российский журнал когнитивной науки*. 2015;2(1):41–51.
12. R Development Core Team (2024) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. [Internet, cited 2024 December 12]. Vienna: Austria. Available from: <https://www.R-project.org>.
13. Bates D, Maechler M, Bolker B, Walker S. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*. 2015;67:1–48.
14. Zuur AF, Ieno EN, Elphick CS. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods of Ecology and Evolution*. 2010;1:3–14.

References

1. Shitikov VK, Mastitskiy SE. *Klassifikatsiya, regressiya i drugiye algoritmy Data Mining s ispol'zovaniyem R* [Classification, Regression and Other Data Mining Algorithms Using R]. [Place unknown]: Elektronnaya kniga; 2017. 351 p. Russian.
2. Legendre P, Legendre L. Numerical Ecology. 3rd edition. Amsterdam: Elsevier Science. BV; 2012. 990 p.
3. Kabacov RI. *R in Action. Data analysis and graphics with R*. Shelter Island, New York: Manning Publications Co.; 2012. 580 p.
4. Borcard D, Gillet F, Legendre P. Numerical Ecology with R. Wien: Springer Nature; 2011. 319 p.
5. McCune B, Grace JB. Analysis of ecological communities. Glendon Beach: MjMSoftware Design; 2002. 304 p.
6. Mastitskiy SE, Shitikov VK. *Statisticheskiy analiz i vizualizatsiya dannykh s pomoshch'yu R* [Statistical analysis and data visualization using R]. Moscow: DMK Press; 2015. 496 p. Russian.
7. Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd edition. New York: Springer; 2009. 745 p.
8. Zuur AF, Ieno EN, Walker N, Saveliev, AA, Smith GM. Mixed Effects Models and Extensions in Ecology With R. New York: Springer; 2009. 574 p.
9. Zuur AF, Ieno EN, Smith GM. Analyzing Ecological Data. New York: Springer; 2007. 672 p.
10. Faraway JJ. Extending the linear model with R: generalized linear, mixed effects and nonparametric regression models. Volume 124. Chapman & Hall/CRC Taylor & Francis Group; 2017. 331 p.
11. Chetverikov AA, *Lineynyye modeli so smeshannymi effektami v kognitivnykh issledovaniyakh* [Linear models with mixed effects in cognitive research]. *Rossiyskiy zhurnal kognitivnoy nauki*. 2015;2(1):41–51. Russian.
12. R Development Core Team (2024) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. [Internet, cited 2024 December 12]. Vienna: Austria. Available from: <https://www.R-project.org>.
13. Bates D, Maechler M, Bolker B, Walker S. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*. 2015;67:1–48.
14. Zuur AF, Ieno EN, Elphick CS. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods of Ecology and Evolution*. 2010;1:3–14.

Статья поступила в редколлегию 29.01.2025.
Received by editorial board 29.01.2025.

УДК 616-006.66

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕРЫВОВ В ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ НА ДОЛГОСРОЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЕЧЕНИЯ АДЕНОКАРЦИНОМЫ ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

А. Н. БАТЯН¹⁾, П. Д. ДЕМЕШКО²⁾, Е. В. ГОНЧАРОВА²⁾, Т. А. ДОМАШНИКОВА³⁾

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

²⁾Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова,
223040, поселок Лесной, Минский р-н, Беларусь

³⁾Брестский областной экологический диспансер,
ул. Медицинская, 6, 224027, Брест, Беларусь

В исследовании проведен анализ влияния перерывов в лучевой терапии на раково-специфическую выживаемость пациентов с аденокарциномой предстательной железы при учете таких факторов, как возраст, сумма Глисона и уровень простатического специфического антигена. В ретроспективное изучение включены данные 360 пациентов, прошедших курс радикальной лучевой терапии в РНПЦ ОМР им. Н. Н. Александрова и Брестском областном онкологическом диспансере с 2008 по 2016 г. Для стратификации пациентов использовалась классификация риска рецидива: первая группа включала пациентов с низким и промежуточным риском, вторая – пациентов с высоким и крайне высоким риском. Медиана наблюдения составила 60 месяцев. Статистический анализ проведен методами регрессии Кокса и Каплана – Мейера.

Образец цитирования:

Батян АН, Демешко ПД, Гончарова ЕВ, Домашникова ТА. Ретроспективный анализ влияния перерывов в лучевой терапии на долгосрочные результаты лечения аденокарциномы предстательной железы. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;1:48–55. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-48-55>

For citation:

Batyan AN, Demeshko PD, Hancharova EV, Damashnikova TA. Retrospective analysis of the impact of interruptions in radiation therapy on long-term treatment outcomes for prostate adenocarcinoma. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;1:48–55. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-48-55>

Авторы:

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

Павел Дмитриевич Демешко – доктор медицинских наук, профессор; главный научный сотрудник лаборатории лучевой терапии.

Екатерина Викторовна Гончарова – младший научный сотрудник лаборатории лучевой терапии.

Татьяна Александровна Домашникова – врач-радиационный онколог.

Authors:

Anatoly N. Batyan, doctor of science (medicine), full professor; head of the department of environmental medicine and radiobiology.

Pavel D. Demeshko, doctor of science (medicine), full professor; chief researcher at the laboratory of radiation therapy.

pdemeshko@me.com

Katsiaryna V. Hancharova, junior research at the laboratory of radiation therapy.

katsiaryna.hancharova@gmail.com

Tatsiana A. Damashnikova, radiation oncologist. domashnikova.t@mail.ru

Установлено, что длительность перерывов в лучевой терапии и сумма Глисона являются значимыми прогностическими факторами ($p < 0,05$). У пациентов с низким и промежуточным риском различия в выживаемости при перерывах менее 3 недель и более 3 недель не были статистически значимыми (89,2 % против 92,5 %, $\rho_{\logrank} = 0,612$). В группах высокого и крайне высокого риска более длительные перерывы (≥ 3 недель) ассоциировались со снижением раково-специфической выживаемости (96,1 % против 89,1 %, $\rho_{\logrank} = 0,026$). Полученные результаты подчеркивают важность строгого контроля сроков проведения лучевой терапии, особенно у пациентов с высокой степенью риска рецидива заболевания. Индивидуализированный подход к лечению, использование таких современных методов ЛТ, как IMRT и VMAT, а также компенсация перерывов в лучевой терапии могут способствовать улучшению долгосрочных клинических исходов.

Ключевые слова: лучевая терапия; аденокарцинома предстательной железы; перерывы в лечении; раково-специфическая выживаемость.

RETROSPECTIVE ANALYSIS OF THE IMPACT OF INTERRUPTIONS IN RADIATION THERAPY ON LONG-TERM TREATMENT OUTCOMES FOR PROSTATE ADENOCARCINOMA

A. N. BATYAN^a, P. D. DEMESHKO^b, E. V. HANCHAROVA^b, T. A. DAMASHNIKAVA^c

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

^bN. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus,
Village Lesnoy 23040, Minsk District, Belarus

^cBrest Regional Oncological Dispensary,
6 Medyczinskaja Street, Brest 224027, Belarus
Corresponding author: A. N. Batiyan (bat@iseu.by)

The aim of this study was to analyze the impact of interruptions in radiation therapy on cancer-specific survival in patients with prostate adenocarcinoma, taking into account factors such as age, Gleason score, and prostate-specific antigen level. The retrospective study included data from 360 patients who underwent radical radiation therapy at the N. N. Alexandrov National Cancer Center and the Brest Regional Oncology Dispensary between 2008 and 2016. Patients were stratified according to recurrence risk classification: the first group included patients with low and intermediate risk, while the second group consisted of those with high and very high risk. The median follow-up period was 60 months. Statistical analysis was performed using Cox regression and the Kaplan-Meier method. It was found that the duration of treatment interruptions and the Gleason score were significant prognostic factors ($p < 0.05$). Among patients with low and intermediate recurrence risk, differences in survival between those with treatment interruptions of less than or more than three weeks were not statistically significant (89,2 % versus 92,5 %, $\rho_{\logrank} = 0,612$). In the high and very high-risk groups, longer interruptions (≥ 3 weeks) were associated with decreased cancer-specific survival (96,1 % versus 89,1 %, $\rho_{\logrank} = 0,026$). The obtained results emphasize the importance of strict adherence to radiation therapy schedules, especially for patients at high risk of disease recurrence. An individualized treatment approach, the use of modern radiation therapy techniques such as IMRT and VMAT, as well as compensation for treatment interruptions, may contribute to improved long-term clinical outcomes.

Keywords: radiation therapy; prostate adenocarcinoma; treatment interruptions; cancer-specific survival.

Введение

Изучая влияние общей продолжительности лучевой терапии (ЛТ) на локальный контроль опухолей в случаях заболеваний, характеризующихся таким медленным пролиферативным процессом, как аденокарцинома предстательной железы, исследователи часто сталкиваются с ограниченным объемом научных данных, нередко отмечаемых противоречиями.

В идеале суммарная общая доза излучения должна быть подведена к опухоли в рамках строго определенных временных интервалов. Однако в рутинной клинической практике перерывы в ЛТ не являются редкостью, что может привести к увеличению общей продолжительности курса лучевого лечения.

Литературные данные содержат различные оценки скорости пролиферации клеток рака предстательной железы (РПЖ). Некоторые исследования показывают, что репопуляция РПЖ аналогична таковой при плоскоклеточном раке головы и шеи, что ставит под сомнение представления о менее срочном лечении рака простаты.

Биологическое поведение медленно растущих опухолей может варьировать в зависимости от длительности перерывов в ЛТ. Например, исследование [1] показало, что увеличение общей продолжительности ЛТ на пять дней не оказывает влияния на результат лечения (локальный контроль и выживаемость)

у пациентов с РПЖ. В то же время удлинение курса лечения до 9 недель ведет к снижению выживаемости по сравнению с более короткими перерывами [2]. Некоторые ученые утверждают, что увеличение продолжительности лечения на две недели не имеет существенного воздействия на долгосрочные результаты ЛТ [3; 4], но даже в случае продления общего времени лечения более чем на пять дней, рассматриваются специальные методы компенсации таких перерывов [1].

Цель данного исследования заключалась в анализе раково-специфической выживаемости при РПЖ у пациентов, завершивших курс радикальной ЛТ. В ходе анализа учитывались продолжительность перерывов в фракционированной ЛТ и влияние таких различных независимых факторов, как возраст, сумма Глисона и уровень ПСА.

В нашем исследовании использовался метод фракционированной 3D-CRT, который был принят в клинической практике и согласован с протоколами ЛТ. Стоит отметить, что фракционированные курсы лечения иногда применяются для снижения тяжести побочных эффектов у пациентов, особенно пожилого возраста или с сопутствующими заболеваниями. Причины перерывов в ЛТ могут быть различными: они могут быть частью заранее спланированной лечебной стратегии или возникать по совершенно иным причинам. Эти перерывы могут зависеть от соблюдения пациентом медицинских рекомендаций или быть вызваны непредсказуемыми обстоятельствами, на которые ни пациент, ни врач не могут повлиять (например, сложная эпидемиологическая обстановка, поломки оборудования и т. д.). Следует отметить, что некоторые клиники до сих пор используют традиционные протоколы лечения. Это может быть связано с отсутствием современных линейных ускорителей и невозможностью применения методов IMRT и VMAT, которые позволяют значительно снизить дозу излучения для органов риска и подвести более высокие дозы излучения к опухоли в режиме гипофракционирования.

Материалы и методы исследования

Нами был проведен ретроспективный анализ пациентов, прошедших курс ЛТ в рамках радикальной программы при гистологически подтвержденной аденокарциноме предстательной железы. В исследовании использованы данные пациентов, завершивших ЛТ в период с 2012 по 2016 г. в Брестском областном онкологическом диспансере и с 2008 по 2012 г. в РНПЦ ОМР им. Н. Н. Александрова. Схемы лечения были восстановлены на основе данных из базы данных планирующей системы Eclipse и сопоставлены с фактическим выполнением на аппаратах ЛТ. Этот процесс позволил получить информацию о фактических датах начала и окончания лечения на радиотерапевтических устройствах, а также о продолжительности перерывов между этапами фракционированной ЛТ. Кроме того, были учтены возраст пациента, стадия заболевания, сумма Глисона и уровень ПСА.

Всего 360 пациентов соответствовали критериям отбора: они прошли только ЛТ с обычным фракционированием (2 Гр на опухолевую мишень за сеанс, пять сеансов облучения в неделю). Основные характеристики пациентов представлены в табл. 1.

Методология дистанционной лучевой терапии. ЛТ проводилась с использованием современных высокоэнергетических линейных ускорителей: *Synergy* производства компании *Elekta* и *Clinac iX* производства компании *Varian*, а также радиотерапевтического кобальтового облучателя типа *Terabalt* модели *ACS*. Для создания дозиметрических планов лечения использовалась технология планирования 3D-CRT, с соблюдением критериев изодозного покрытия опухоли и минимизации возможных нагрузок на органы, находящиеся в зоне риска, согласно рекомендациям QUANTEC [5].

Контурирование объемов облучения и назначение дозы радиации. Определенный объем опухоли (GTV), включая как первичную опухоль, так и лимфатические узлы, пораженные опухолью, а также другие анатомические структуры, основывался на МРТ/КТ- и/или ПЭТ/КТ-изображениях. Все пациенты проходили компьютерную томографию (КТ) для планирования лечения, выполненную на многослойном КТ-сканере с толщиной среза 3–5 мм. Контуры объемов облучения и критических органов выполнялись на каждом КТ-снимке.

Клинический объем опухоли (CTV) включал GTV плюс дополнительный объем тканей (зоны высокого риска субклинического распространения опухоли) на 0,5–1,0 см во всех направлениях, а также уровни непораженных лимфатических узлов, находящихся в зоне риска субклинического распространения опухоли. Планируемый объем облучения (PTV) включал CTV плюс 0,8–1,0 см во всех направлениях. Назначенная доза для планируемого объема облучения в обычной схеме радиотерапии составляла 68–74 Гр с использованием фракционированного курса: после подведения запланированной дозы 40–50 Гр делался перерыв в лучевом лечении на 2–4 недели, после чего ЛТ продолжалась с дополнительной дозой 30–20 Гр соответственно. Лимфатические узлы малого таза лечились выборочно у пациентов с N1 и N0, имеющих высокий риск субклинического распространения опухоли (по формуле Роача для прогнозирования вовлеченности лимфатических узлов). Доза для лимфатических узлов малого таза обычно составляла 45–50 Гр. Андрогенная депривационная терапия (АДТ) была назначена 83,9 % пациентам с неблагоприятным высоким или очень высоким риском рецидива РПЖ.

Характеристики пациентов

Table 1

Patient characteristics

Показатель	Значение
Число пациентов	360
Медиана возраста (разброс значений), годы	71 (36–89)
< 70, абс. (%)	147 (40,8)
≥ 70, абс. (%)	182 (50,6)
данные отсутствуют	31 (8,6)
Клиническая стадия	
T1–T2, абс. (%)	110 (30,6)
T3–T4, абс. (%)	250 (69,4)
Медиана перерывов (разброс значений), недели	3 (0–11)
< 3, абс. (%)	191 (53,1)
≥ 3, абс. (%)	169 (46,9)
ПСА	
≤ 10, абс. (%)	110 (30,6)
10–20, абс. (%)	82 (22,8)
≥ 20, абс. (%)	121 (33,6)
данные отсутствуют	47 (13,1)
Категория N	
N0, абс. (%)	348 (96,7)
N1, абс. (%)	12 (3,3)
Сумма Глисона	
≤ 6, абс. (%)	180 (50,0)
7, абс. (%)	120 (33,3)
≥ 8, абс. (%)	30 (8,3)
данные отсутствуют	30 (8,3)
Медиана СОД	74 Гр
Медиана длительности наблюдения (разброс значений), месяцы	60 (6–131)
Группы риска	
Низкая и промежуточная, абс. (%)	77 (24,1)
Высокая и крайне высокая, абс. (%)	283 (78,6)
Андрогенная депривационная терапия	
Группа без АДТ, абс. (%)	58 (16,1)
Группа с АДТ, абс. (%)	302 (83,9)

Стратификация по группам риска рецидива заболевания. На основе данных об уровне ПСА, суммы Глисона в биопсии и клинической стадии распространения заболевания, согласно действующему протоколу лечения в соответствии с клиническими рекомендациями и классификацией NCCN [6; 7], пациенты были разделены на две группы. В первую группу включены пациенты с низким и промежуточным риском рецидива заболевания, определяемым по следующим критериям: ПСА < 10 нг/мл и сумма Глисона ≤ 6 (сT1–сT2a) или ПСА 10–20 нг/мл, сумма Глисона = 7 (сT2b). Во вторую группу вошли пациенты с высоким и крайне высоким риском рецидива, характеризующиеся ПСА > 20 нг/мл или суммой Глисона > 7 (сT2c), а также любыми показателями ПСА и суммы Глисона при сT3–T4 или N1. Разделение пациентов по этим группам позволило провести сравнительный анализ влияния перерывов в ЛТ на раково-специфическую выживаемость с учетом прогностических факторов.

Статистический анализ. Исходные данные включали как количественные, так и качественные характеристики. Статистическая обработка полученных данных включала анализ регрессии Кокса, проведенный с целью определения того, связаны ли переменные с выживаемостью исследуемых и для оценки влияния независимых переменных на вероятность наступления события. Для оценки результатов по времени был проведен анализ данных с использованием метода Каплана – Мейера. В качестве конечной точки для отслеживания было выбрано наступление смерти от основного заболевания с акцентом на раково-специфическую выживаемость. Таким образом, событие произошло у 27 пациентов, что составило 7,5 % от общего числа пациентов.

Результаты исследования и их обсуждение

Однофакторный анализ показал, что длительность перерывов в ЛТ и сумма Глисона имеют прогностическое значение для раково-специфической выживаемости (уровень значимости, $p < 0,05$) (табл. 2). Тот же тренд наблюдался для уровней ПСА и возраста пациентов (< 70 лет против ≥ 70 лет). Статистически значимых различий между клиническими стадиями не было обнаружено.

Таблица 2

Прогностические факторы однофакторной модели регрессии Кокса ($n = 360$)

Table 2

Prognostic factors by univariate Cox regression model ($n = 360$)

Переменные	Отношение рисков, HR (95 % CI)	Уровень значимости p_{Cox}
Возраст (годы) < 70 против ≥ 70	0,478 (0,209–1,092)	0,080
Клиническая стадия T1–T2 против T3–T4	1,053 (0,461–2,406)	0,903
Длительность перерыва	1,027 (1,000–1,054)	< 0,05
ПСА < 10 против 10–20 < 10 против >20	0,313 (0,088–1,110) 0,645 (0,264–1,579)	0,072 0,337
Сумма Глисона < 6 против 7 < 6 против ≥ 8	2,053 (0,809–5,208) 3,678 (1,103–12,266)	0,130 < 0,05
АДТ Группа с АДТ против без АДТ	1,129 (0,390–3,267)	0,823

Многофакторный анализ включил те показатели, которые оказали наибольшее влияние на выживаемость: длительность перерывов в ЛТ и сумму Глисона (табл. 3).

Таблица 3

Многофакторный анализ на основе модели регрессии Кокса ($n = 360$)

Table 3

Multivariate analyses of factors based on the Cox regression model ($n = 360$)

Переменные	Отношение рисков, HR (95 % CI)	Уровень значимости p_{Cox}
Сумма Глисона	1,835 (1,026–3,283)	< 0,05
Длительность перерыва	1,027 (0,996–1,058)	0,086

Многофакторный анализ свидетельствует, что сумма Глисона имеет наибольшее влияние на раково-специфическую выживаемость (уровень значимости, $p < 0,05$). Хотя длительность перерывов в ЛТ не показала статистически значимого влияния на выживаемость пациентов в многофакторном анализе, было проведено дополнительное исследование для оценки влияния этого параметра в условиях, когда сумма Глисона, уровень ПСА и стадия заболевания оказывают равное влияние на долгосрочные результаты лечения – при стратификации пациентов по группам риска.

Мы провели анализ Каплана – Мейера отдельно для двух групп пациентов. Первая группа включала пациентов с низким и промежуточным риском рецидива заболевания (см. табл. 1), а во вторую группу входили пациенты с высоким и крайне высоким риском. В группах с низким и промежуточным риском было зафиксировано 7 событий. В группах с высоким и крайне высоким риском произошло 20 событий.

Результаты анализа показывают, что перерывы в ЛТ РПЖ не оказывают статистически значимого влияния на выживаемость пациентов в группах с низким и промежуточным риском ($\rho_{\logrank} = 0,612$) (табл. 4, рис. 1). Однако в случае ЛТ РПЖ в группах с высоким и крайне высоким риском перерывы в лучевом лечении оказывают влияние на выживаемость пациентов ($\rho_{\logrank} = 0,026$) (табл. 4, рис. 2).

Среднее время выживаемости и процент накопленной выживаемости
в зависимости от продолжительности перерывов в лечении

Table 4

Mean survival time and percentage of cumulative survival depending on the duration of treatment interruption

Группирующий фактор	Подгруппы	Количество пациентов	Медиана времени выживания	Накопленная доля выживших, % ± SE	Уровень знач. (p_{\logrank})
Низкий и промежуточный риск рецидива	Перерыв < 3 недель	37	не достигнута	88,20 ± 5,6	0,612
	Перерыв ≥ 3 недель	40	не достигнута	89,70 ± 5,7	
Высокий и крайне высокий риск рецидива	Перерыв < 3 недель	154	не достигнута	95,90 ± 1,6	0,026
	Перерыв ≥ 3 недель	129	не достигнута	87,70 ± 3,3	

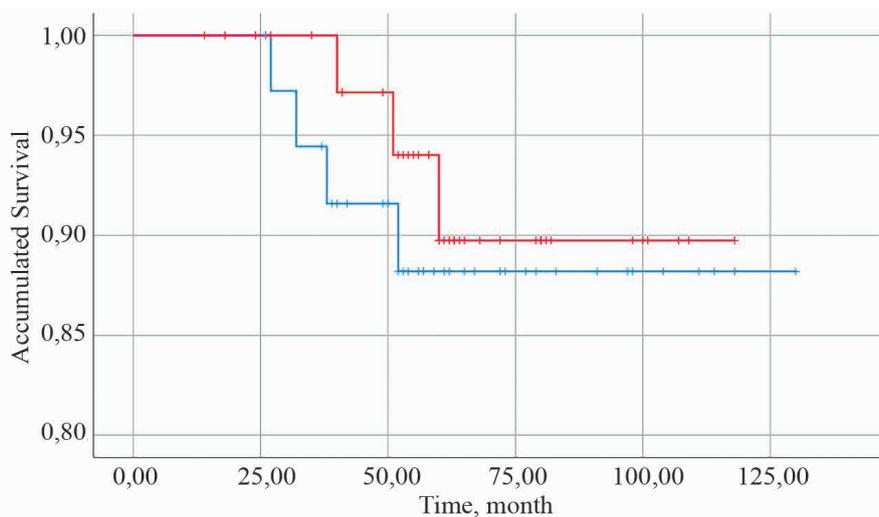


Рис. 1. Раково-специфическая выживаемость для I группы пациентов в зависимости от перерывов в лучевом лечении, $p_{\logrank} = 0,612$. Синяя линия соответствует перерывам < 3 нед., красная линия – ≥ 3 нед.

Fig. 1. Cancer-specific survival for group I patients depending on interruptions in radiation treatment, $p_{\logrank} = 0,612$. The blue line corresponds to breaks of less than 3 weeks, the red line to more

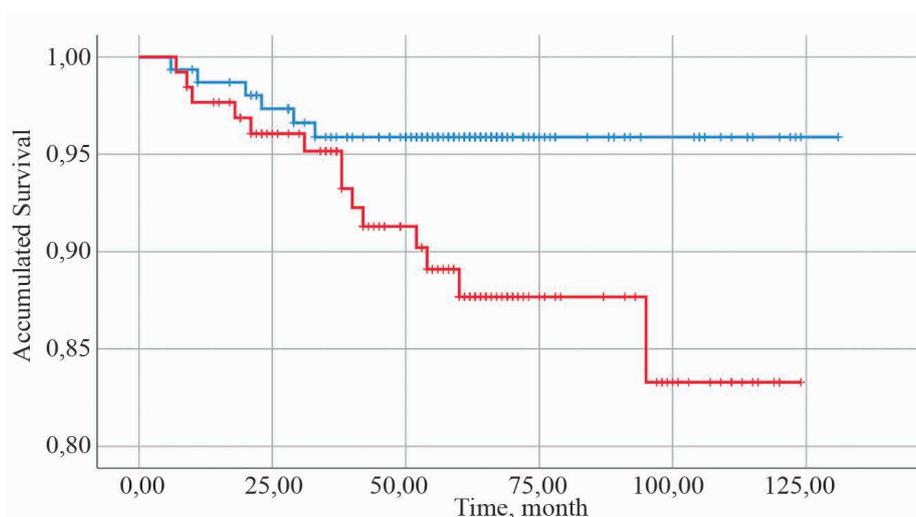


Рис. 2. Раково-специфическая выживаемость для II группы пациентов в зависимости от перерывов в лучевом лечении, $p_{\logrank} = 0,026$. Синяя линия соответствует перерывам < 3 нед., красная линия – ≥ 3 нед.

Fig. 2. Cancer-specific survival for group II patients depending on interruptions in radiation treatment, $p_{\logrank} = 0,026$. The blue line corresponds to breaks of less than 3 weeks, the red line to more

Однофакторный анализ выявил прогностическое значение длительности перерывов в ЛТ и суммы Глисона для раково-специфической выживаемости ($p < 0,05$). Подобные закономерности наблюдались также для уровней ПСА и возраста пациентов (< 70 лет против ≥ 70 лет), при этом статистически значимых различий по клиническим стадиям не было обнаружено.

В многофакторном анализе сумма Глисона показала наиболее выраженную связь с раково-специфической выживаемостью ($p < 0,05$). Хотя длительность перерывов в ЛТ не оказала статистически значимого влияния на выживаемость пациентов в многофакторном анализе, было проведено дополнительное исследование при условии, когда сумма Глисона, уровень ПСА и стадия заболевания оказывают равное влияние на долгосрочные результаты лечения при стратификации пациентов по группам риска рецидива заболевания. Было выявлено, что перерывы в ЛТ РПЖ не оказывали значительного влияния на выживаемость пациентов в группах с низким и промежуточным риском ($\rho_{\logrank} = 0,612$). Однако для ЛТ РПЖ в группах с высоким и крайне высоким риском перерывы в ЛТ оказали влияние на выживаемость пациентов ($\rho_{\logrank} = 0,026$).

Исходя из результатов анализа, можно сделать вывод, что исследования влияния перерывов в ЛТ на долгосрочные результаты лечения целесообразно проводить при стратификации пациентов на группы риска рецидива заболевания. Для групп с низким и промежуточным риском биология процессов, происходящих в опухоли, отличается от таковой в группах с высоким и крайне высоким риском, что объясняет широкий диапазон значений коэффициента пролиферации рака предстательной железы от 0,24 до 0,52 Гр/день [8–10].

Кроме того, необходимо подчеркнуть, что при планировании ЛТ для пациентов с высоким и крайне высоким риском особое внимание следует уделить не только соблюдению дозово-временных параметров, но и минимизации воздействия возможных перерывов в ходе ЛТ. В случае необходимости перерыва в ЛТ рекомендуется тщательно оценить снижение эффективности доставленной дозы радиации опухоли с использованием инструментов для такой оценки, например веб-приложения «Линейно-квадратичная модель для медицинских физиков и врачей радиационных онкологов» [11–13]. Методика разработана авторами и зарегистрирована как объект авторского права (Свидетельство о регистрации объекта авторского права № 1487-КП от 25.03.2022 г.)¹. Это подчеркивает важность индивидуализированного подхода к лечению, основанного на уникальных характеристиках каждого пациента и особенностях их опухоли.

Заключение

В однофакторном анализе переменных было установлено, что длительность перерывов в ЛТ и сумма Глисона имеют прогностическое значение для раково-специфической выживаемости при раке простаты ($p < 0,05$). Аналогичная тенденция наблюдалась для уровней ПСА и возраста пациентов (менее 70 лет против более 70 лет). Статистически значимых различий по клиническим стадиям не было выявлено.

Многофакторный анализ показал, что сумма Глисона имеет наибольшую связь с раково-специфической выживаемостью ($p < 0,05$).

Накопленная раково-специфическая выживаемость у группы с низким и промежуточным риском с длительностью перерывов в ЛТ < 3 недели по сравнению с группой пациентов, завершивших лечение с перерывом более 3 недель, не показала статистически значимой разницы (89,2 % против 92,5 %, $\rho_{\logrank} = 0,612$).

Накопленная раково-специфическая выживаемость у группы с высоким и крайне высоким риском с длительностью перерывов в ЛТ < 3 недели по сравнению с группой пациентов, завершивших лечение с перерывом более 3 недель, имеет статистически значимую разницу (96,1 % против 89,1 %, $\rho_{\logrank} = 0,026$).

Таким образом, влияние перерывов в ходе ЛТ и понимание воздействия контролируемых факторов важно учитывать при выборе оптимальных стратегий лечения.

Библиографические ссылки

1. The timely delivery of radical radiotherapy: guidelines for the management of unscheduled treatment interruptions, 4th edition. London: The Royal College of Radiologists; 2019. 39 p.
2. Perez CA, Michalski J, Mansur D, et al. Impact of elapsed treatment time on outcome of external-beam radiation therapy for localized carcinoma of the prostate. *Cancer*. 2004;10(6):349–356.
3. Haustermans K, Hofland I, Poppel HV, et al. Cell kinetic measurements in prostate cancer. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. 1997;37(5):1067–1070.
4. Lai PP, Pilepich MV, Krall JM, et al. The effect of overall treatment time on the outcome of definitive radiotherapy for localized prostate carcinoma: the Radiation Therapy Oncology Group 75-06 and 77-06 experience. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. 1991;21(4):925–933.

¹Свидетельство о добровольной регистрации и депонировании объекта авторского права № 1487-КП. Линейно-квадратичная модель для медицинских физиков и радиационных онкологов / А. Н. Оргиш, А. Н. Батын, П. Д. Демешко [и др.]: заявлено 26.02.2022; зарегистрировано 25.03.2022. Контрольная сумма файлов: 7F3A4537220CB96c4968CC50EBD493A5.

5. Quantitative analysis of normal tissue effects in the clinic (QUANTEC). Review on the tolerance of normal tissue to therapeutic radiation. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. 2010;76(3):S1–S120.
6. Алгоритмы диагностики и лечения злокачественных новообразований: клинический протокол. Минск : Профессиональные издания; 2019. 616 с.
7. Демешко ПД, Красный СА, Леусик ЕА. *Лучевая диагностика и лучевая терапия рака предстательной железы*. Минск: Бизнесофсет; 2016. 160 с.
8. Thames HD, Kuban D, Levy LB, et al. The role of overall treatment time in the outcome of radiotherapy of prostate cancer: An analysis of biochemical failure in 4839 men treated between 1987 and 1995. *Radiotherapy and Oncology*. 2010;96:6–12.
9. Miralbell R, Roberts SA, Zubizarreta E, et al. Dose-fractionation sensitivity of prostate cancer deduced from radiotherapy outcomes of 5,969 patients in seven international institutional datasets: $\alpha/\beta = 1.4$ (0.9–2.2) Gy. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. 2012;82(1):e17–24.
10. Pedicini P, Strigari L, Benassi M. Estimation of a self-consistent set of radiobiological parameters from hypofractionated versus standard radiation therapy of prostate cancer. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. 2013;85(5):e231–237.
11. Batyan A, Dziameshka P, Hancharova K, Lemiasheuski V, Orgish A. Linear Quadratic Model in the Clinical Practice via the Web-Application [Internet, cited 2025 January 24]. Radiation Therapy. IntechOpen. 2023. 146 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.10962112>.
12. Батын АН, Гончарова ЕВ, Гайда АВ, и др. Веб-приложение исследования эффективности доз излучения при изменении графика лучевого лечения. *Здравоохранение*. 2024;2(923):45–52.
13. Batyan AN, Hancharova KV, Dziameshka PD. Utilizing the linear-quadratic model for optimizing radiation therapy in clinical practice through a web application. In: Actual environmental problems. Proceedings of the XVI International Scientific Conference of young scientists, graduates, master and PhD students, 2024 December 5–6. Minsk: [publisher unknown]; 2023. p. 82–83.

References

1. The timely delivery of radical radiotherapy: guidelines for the management of unscheduled treatment interruptions, 4th edition. London: The Royal College of Radiologists; 2019. 39 p.
2. Perez CA, Michalski J, Mansur D, et al. Impact of elapsed treatment time on outcome of external-beam radiation therapy for localized carcinoma of the prostate. *Cancer*. 2004;10(6):349–356.
3. Haustermans K, Hofland I, Poppel HV, et al. Cell kinetic measurements in prostate cancer. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. 1997;37(5):1067–1070.
4. Lai PP, Pilepich MV, Krall JM, et al. The effect of overall treatment time on the outcome of definitive radiotherapy for localized prostate carcinoma: the Radiation Therapy Oncology Group 75-06 and 77-06 experience. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. 1991;21(4):925–933.
5. Quantitative analysis of normal tissue effects in the clinic (QUANTEC). Review on the tolerance of normal tissue to therapeutic radiation. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. 2010;76(3):S1–S120.
6. *Алгоритмы диагностики и лечения злокачественных новообразований: клинический протокол* [Algorithms for diagnosis and treatment of malignant neoplasms: clinical protocol]. Минск: Professional publications; 2019. 616 p. Russian.
7. Dziameshka PD, Krasny SA, Leusik EA. *Лучевая диагностика и лучевая терапия рака предстательной железы* [Radiation diagnosis and radiotherapy of prostate cancer]. Минск: Бизнесофсет; 2016. 160 p. Russian.
8. Thames HD, Kuban D, Levy LB, et al. The role of overall treatment time in the outcome of radiotherapy of prostate cancer: An analysis of biochemical failure in 4839 men treated between 1987 and 1995. *Radiotherapy and Oncology*. 2010;96:6–12.
9. Miralbell R, Roberts SA, Zubizarreta E, et al. Dose-fractionation sensitivity of prostate cancer deduced from radiotherapy outcomes of 5,969 patients in seven international institutional datasets: $\alpha/\beta = 1.4$ (0.9–2.2) Gy. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. 2012;82(1):e17–24.
10. Pedicini P, Strigari L, Benassi M. Estimation of a self-consistent set of radiobiological parameters from hypofractionated versus standard radiation therapy of prostate cancer. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. 2013;85(5):e231–237.
11. Batyan A, Dziameshka P, Hancharova K, Lemiasheuski V, Orgish A. Linear Quadratic Model in the Clinical Practice via the Web-Application [Internet, cited 2025 January 24]. Radiation Therapy. IntechOpen. 2023. 146 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.10962112>.
12. Batyan AN, Hancharova KV, Haida AV, et al. *Веб-приложение исследования эффективности доз излучения при изменении графика лучевого лечения* [Web Application for Studying the Effectiveness of Radiation Doses with modified Radiotherapy Schedules]. *Healthcare* (Minsk). 2024;2(923):45–52.
13. Batyan AN, Hancharova KV, Dziameshka PD. Utilizing the linear-quadratic model for optimizing radiation therapy in clinical practice through a web application. In: Actual environmental problems. Proceedings of the XVI International Scientific Conference of young scientists, graduates, master and PhD students, 2024 December 5–6. Minsk: [publisher unknown]; 2023. p. 82–83.

Статья поступила в редакцию 28.01.2025.

УДК 572.024.613.96

ВЛИЯНИЕ КУРЕНИЯ НА БИОЛЕМЕНТНЫЙ СТАТУС МОЛОДЫХ ЛЮДЕЙ

Б. Э. ТУРГУНОВА¹⁾, К. Б. АЛЛАЕВА²⁾, Ю. В. ЖИЛЬЦОВА³⁾

¹⁾Израильский медицинский центр репродуктивной медицины и здоровья семьи,
ул. Дархан, 3, 100052, г. Ташкент, Узбекистан

²⁾Патоморфологическая лаборатория «IPSUM Pathology»,
ул. Фараби, 332А, 100015, г. Ташкент, Узбекистан

³⁾Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

Получены данные о содержании макро- и микроэлементов в организме курящих и некурящих молодых людей 18–22 лет, что важно для своевременной коррекции биоэлементного статуса молодежи, сохранения и укрепления их здоровья, а также пропаганды здорового образа жизни. Установлено, что медианы концентраций по всем исследованным элементам (Ca, Cu, Fe, Mn, Zn, Cr, Pb, Cd и Hg) в волосах у курящих и некурящих молодых людей не имели статистических различий ($p > 0,05$). Однако у курящих юношей значимо чаще встречался недостаток кальция (в 2 раза, $p = 0,05$), марганца (в 1,05 раза) и реже нормальное содержание Fe (в 1,1 раза), чем у некурящих сверстников. У курящих девушек значимо чаще встречался недостаток цинка (в 1,6 раза), чем у некурящих ровесниц, у которых к тому же концентрации кальция в 3,1 раза чаще находились в диапазоне референсных значений. Курящие девушки значимо чаще ($p = 0,05$) имели дисбаланс таких элементов, как Cu (избыток), Fe (недостаток), Zn (недостаток) по сравнению с курящими юношами.

Ключевые слова: курение; вейпинг; химические элементы; биоэлементный статус; тяжелые металлы; биологическая роль элементов; волосы; молодые люди.

Благодарность. Авторы выражают признательность сотрудникам лаборатории экологического мониторинга и экологического менеджмента МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, оказывавших содействие при выполнении дипломного проектирования.

INFLUENCE OF SMOKING ON THE BIOELEMENTAL STATUS OF YOUNG PEOPLE

B. E. TURGUNOVA^a, K. B. ALAYEVA^b, Yu. V. ZHYLTSOVA^c

^aIsraeli Medical Center for Reproductive Medicine and Family Health,
3 Darhan Street, Tashkent 100052, Uzbekistan

^bPathomorphological laboratory «IPSUM Pathology»,
332A Faraby Street, Tashkent 100015, Uzbekistan

^cInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Dauhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

Corresponding author: Zhylytsova@mail.ru (Zhylytsova@mail.ru)

Образец цитирования:

Тургунова БЭ, Аллаева КБ, Жильцова ЮВ. Влияние курения на биоэлементный статус молодых людей. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2025;1:56–66. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-56-66>

For citation:

Turgunova BE, Alayeva KB, Zhylytsova YuV. Influence of smoking on the bioelemental status of young people. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2025;1:56–66. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-56-66>

Авторы:

Багила Эльмухаммад кизи Тургунова – врач-лаборант.
Комила Ботировна Аллаева – врач-лаборант патоморфологической лаборатории.
Юлия Валентиновна Жильцова – кандидат биологических наук; доцент кафедры общей биологии и генетики.

Authors:

Bagila E. Turgunova, laboratory doctor.
Bagilaturgunova7@gmail.com
Komila B. Alayeva, laboratory doctor at the laboratory of pathomorphology.
akamila628@gmail.com
Yuliya V. Zhylytsova, PhD (biology); associate professor at the department of general biology and genetics.
Zhylytsova@mail.ru

Data were obtained on the content of macro- and microelements in the organism of smoking and non-smoking young people aged 18–22. The results are important for the timely correction of the bioelement status of young people, for preserving and strengthening their health, and promoting a healthy lifestyle. It was found that the median concentrations for all studied elements (Ca, Cu, Fe, Mn, Zn, Cr, Pb, Cd и Hg) in the hair of smoking and non-smoking young people did not have statistical differences ($p > 0.05$). However, smoking young men were significantly more likely to have a deficiency of calcium (2 times, $p = 0.05$), manganese (1.05 times) and less likely to have a normal Fe content (1.1 times) than their non-smoking peers. Smoking girls were significantly more likely to have zinc deficiency (1.6 times) than non-smoking girls of the same age, whose calcium concentrations were 3.1 times more likely to be within the reference range. Smoking girls were significantly ($p = 0.05$) more likely to have an imbalance of elements such as Cu (excess), Fe (deficiency), Zn (deficiency) compared to smoking boys.

Keywords: smoking; vaping; chemical elements; bioelement status; heavy metals; biological role of elements; hair; young people.

Acknowledgments. The authors express deep gratitude to the employees of the Laboratory of Environmental Monitoring and Environmental Management of the ISEI BSU, who provided assistance in completing the diploma design.

Введение

Курение – один из факторов, существенно отягощающий имеющиеся заболевания дыхательной, сердечно-сосудистой и пищеварительной систем [1], повышает риски возникновения рака легких, почек, мочевого пузыря, мочеоточника, придаточных пазух носа, полости рта, глотки, гортани, пищевода, желудка, поджелудочной железы, печени и крови [2], хронических бронхитов и других патологий, что в свою очередь сказывается на качестве жизни и ее продолжительности у курильщиков. В результате мета-анализа [3] установлено, что у активных курильщиков в 1,37 раза, а у пассивных – в 1,22 раза выше относительный риск развития сахарного диабета 2 типа. Основными доказанными в экспериментах негативными эффектами компонентов пара электронных сигарет являются: артериальная гипертензия, гипертрофия миокарда, истончение стенки аорты [4], повреждение гепатоцитов печени [5], активация воспалительного [6] и оксидативного стресса [5] в печени, нейропатии [7], активация апоптоза клеток почек в результате повышенного содержания активных форм кислорода и дисфункция почек [5]. По данным Всемирной организации здравоохранения, курение является причиной 10 % общей смертности взрослого населения [2]. По данным Т. В. Чижовой [1], существует положительная корреляционная связь между числом людей, имеющих определенные заболевания, и стажем курения: коэффициент корреляции изменяется в пределах 0,77–0,87, причем у женщин эта связь более тесная.

Табачный дым содержит большое количество химических веществ (более 4000, в табаке – около 3000 [2]), неблагоприятно влияющих на здоровье человека: сероводород, синильную кислоту, угарный газ, аммиак и табачный деготь, который представляет собой концентрат из продуктов горения и сухой перегонки табака, содержит большое количество химических соединений (около сотни, в том числе тяжелые металлы – As, Hg, Cd, Pb, Cr, Zn, Cu, Ni), многие из которых способны оказывать канцерогенный эффект. Установлено, что за 10 лет и более при выкуривании более 20 сигарет ежедневно в организм попадает более 1,5 кг различных химических веществ, а масса тяжелых металлов может достигать 21–24 г [8]. Кроме того, известно, что ряд тяжелых металлов (Zn, Cd, Pb, Cu, Hg, Ni [2]), содержащихся в табаке сигарет, в процессе курения частично [8] или полностью переходит в сигаретный дым [9], попадает в организм человека в виде аэрозоля и имеет биологически и химически активную форму. Известно, что боковой табачный дым, который выделяется через папиросную бумагу в окружающую среду и вдыхается окружающими при пассивном курении, содержит в 2,9–3,3 раза больше Pb, в 4,3–12,2 раза больше Cd, в 3 раза больше Hg по сравнению с основным табачным дымом, вдыхаемым курильщиком [2]. Некоторые электронные сигареты содержат большое количество ионов свинца и других тяжелых металлов, ионы которых выделяются из спирали накаливания испарителя. Установлено, что в паре вейпов содержится свинец, никель, хром и марганец. При этом доля тяжелых металлов в испарениях превышает норму в десятки раз. Пассивное курение способно провоцировать, согласно статистическим данным, более 30 % заболеваний, ассоциированных с табаком. Таким образом, в группе риска находятся как сами курильщики и вейперы, так и окружающие их люди.

Поступая в кровоток, тяжелые металлы способны запускать процессы поражения сосудов [8; 10]. Кроме того, свинец, кадмий и ртуть обладают токсичными, канцерогенными и кумулятивными свойствами. Известно, что наблюдается прямопропорциональная зависимость между длительностью и частотой курения, количеством Cd во внутреннем слое аорты курящего человека, а концентрация Cd в сыворотке крови у курящего человека в 2 раза выше, чем у некурящего. Pb, Cu и Cd обнаружены в повышенных концентрациях в хрусталике глаза людей, выкуривающих более 10 сигарет в день в течение 10 лет и более [8]. У курящих людей выше содержание Cd, Pb и Hg в волосах [11].

Поступление в организм повышенного количества тяжелых металлов препятствует усвоению эссенциальных (жизненнонеобходимых) элементов, способствует развитию микроэлементозов – состояний, объединяющих все симптомы и заболевания, являющиеся следствием наличия дефицита, избытка или дисбаланса микроэлементов в организме. Согласно современным научным представлениям, микроэлементозы являются одной из основополагающих причин развития и нарушения состояния здоровья человека.

Цель исследования – выявить особенности элементного статуса курящих молодых людей (18–22 лет). В связи с чем решались следующие задачи:

1. Провести анкетирование молодых людей и отбор проб биоматериала (волосы).
2. Определить концентрации макро- и микроэлементов в волосах молодых людей.
3. Оценить различие биоэлементного статуса курящих и некурящих людей.

В работе понятие «курящие» является собирательным, объединяющим курильщиков классических сигарет и/или использующих электронные устройства.

Материалы и методы исследования

Анкетирование проводилось в период с 2021 по 2023 г. среди молодых людей в возрасте 18–22 лет, обучающихся в Международном государственном экологическом институте им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета (далее – МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ).

В качестве инструмента исследования использовалась разработанная анкета, состоящая из 10 пунктов. Студентам были заданы вопросы о половой принадлежности, возрасте, отношении к курению/вейпингу, частоте и стаже курения/вейпинга. В анкету также входил блок вопросов о применении специальных средств ухода за волосами, использование которых в последние 2 недели могло повлиять на итоги исследований. В результате проведенного анкетирования были сформированы группы курящих (лица, которые в настоящее время курят табачные изделия ежедневно или нерегулярно) и некурящих (лица, никогда не курившие) молодых людей.

В анкетировании приняли участие 69 студентов, из них 60,9 % ($n = 42$) – юноши и 39,1 % ($n = 27$) – девушки.

Волосы как объект исследований. Обоснование выбора биосубстрата для анализа. Согласно современным представлениям, элементный состав таких биосубстратов человека, как кровь, моча, волосы, отражает концентрацию химических элементов во внутренней среде организма и их метаболизм. При интерпретации полученных результатов содержания химических элементов в органах и тканях человека учитываются все возможные пути поступления их в организм – повышенное содержание элементов в воде, в почве, пище, проживание людей вблизи промышленных объектов, преднамеренное введение. Наиболее доступными материалами для забора проб и исследования их элементного состава являются моча, кровь и волосы. Однако волосы как объект исследования имеют следующие преимущества по сравнению с другими биосубстратами: высокая концентрация в них химических элементов, неинвазивность отбора проб, легкость сбора, транспортировки и хранения. У выросшего волоса отсутствует метаболическая активность, что приводит к накоплению макро- и микроэлементов, позволяет проводить ретроспективные анализы за определенные промежутки времени и на ранних стадиях выявлять изменения в организме при латентном течении паталогических процессов.

Объектами исследования являлись волосы 69 студентов МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ в возрасте 18–22 лет. Из них 36 курящих (21 юноша, 15 девушек), 33 некурящих (21 юноша, 12 девушек). Все студенты дали письменное добровольное согласие на участие в анкетировании и определении химических элементов в волосах. В волосах определялись концентрации следующих элементов: Ca, Fe, Cu, Zn, Mn, Cr, Pb, Cd и Hg. Полученные результаты сравнивались с референсными значениями, представленными в табл. 1.

Порядок отбора проб волос. Правила сбора волос включали в себя выполнение требований, с которыми были ознакомлены участники исследования: волосы должны были быть чистыми, не допускалось перед анализом нанесение на волосы средств по уходу и укладке. Проводить анализ окрашенных волос рекомендовалось через 2 мес. после процедуры их окрашивания. За 2 недели до сдачи волос на анализ было рекомендовано прекратить использование лечебных шампуней, средств против перхоти, муссов, лечебных бальзамов и гелей.

При отборе проб волосы состригали в виде тонких прядей из 4–5 мест на затылке ближе к шее. Всего получали пучок толщиной в 3–4 мм и длиной 4 см. Если волосы были длинными – оставляли 4 см пучка волос от корней. Если волосы были короткие, состригали столько волос, чтобы заполнить чайную ложку. Пряди вкладывали в чистый бумажный конверт, на котором указывали идентификационный номер, дублируемый в анкете.

Референсные значения концентраций элементов в волосах человека, мг/кг

Table 1

Reference values for concentrations of elements in human hair, mg/kg

Элемент минимум		Референсные значения [12–14]	
		минимум	максимум
Ca	мужчины	300	1000
	женщины	300	1700
Zn		114	320
Fe		13	35
Cu		4	30
Mn		0,5	2
Cr		0	5
Cd		0	1
Pb		0	5
Hg		0	2

Определение содержания химических элементов в волосах рентгенофлуоресцентным методом. Содержание химических элементов в волосах определяли согласно зарегистрированной методике выполнения измерений массовой доли химических элементов в биообъектах (волосах) методом рентгенофлуоресценции с использованием спектрометра энергий рентгеновского излучения СЕР-01 (ElvaX, Украина, регистрация в БелГИМ под № МВИ.МН 3814-2011) на базе лаборатории кафедры экологического мониторинга и менеджмента МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ. Отобранные образцы промывали в ацетоне и дистиллированной воде от поверхностного загрязнения, высушивали в лабораторном сушильном шкафу при температуре 40 °С, тщательно измельчали ножницами. Из измельченного количества волос на весах формировали навеску 0,1000 г ± 0,0001 г. В навеску добавляли клеевой состав и после высыхания спрессовывали в таблетку диаметром 10 мм при помощи гидравлического пресса из комплекта спектрометра. Измерения подготовленных образцов, а также обработку полученных результатов проводили согласно руководству по эксплуатации прибора. Параллельные измерения образца проводили в 4-кратной повторности.

Статистическая обработка данных. Оценка нормальности распределения параметров проводилась с использованием критериев Шапиро – Уилка для выборок с числом значений 50 и менее и Колмогорова – Смирнова для больших выборок.

Количественные характеристики, соответствующие закону нормального распределения, представляли в виде среднего значения, стандартного отклонения, средней стандартной ошибки, минимальных и максимальных значений. Сравнение двух групп с количественными характеристиками с одинаковой общей дисперсией и в соответствии с нормальным законом распределения проводилось в соответствии с критериями Стьюдента.

Для количественных характеристик, не подчиняющихся нормальному закону распределения, определялись медиана, квартили, квартильный размах, минимальное и максимальное значения. Сравнение двух групп с количественными характеристиками, имеющими распределение, отличное от нормального, проводили в соответствии с критериями Шапиро – Уилка.

Во всех случаях различия считались статистически значимыми при уровне значимости $p \leq 0,05$. Статистический анализ полученных результатов выполнен с использованием компьютерных пакетов статистических программ EXCEL 2016 и STATISTICA, графическое представление результатов проводилось с использованием пакета прикладных программ EXCEL 2016, STATISTICA 13.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты анкетирования молодых людей МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ по вопросам курения. Более чем у 86 % курящих молодых людей стаж курения составлял от 1 до 3 лет. Из опроса установлено, что юноши предпочитают обычные табачные изделия (81 % курящих респондентов), а девушки отдают предпочтение электронным сигаретам (80 %). Количество сигарет, которое выкуривают молодые люди

в день варьирует от 3 до 25 штук. В среднем это 13 ± 1 штук/сутки (медиана – 12 штук/сутки). Количество вдохов («парений») у вейперов изменяется от 200 до 1000. В среднем это 562 ± 25 вдохов/сутки (медиана – 525 вдохов/сутки). Частой причиной курения молодые люди называли «нервное перенапряжение» – 50 % опрошенных. Кроме того, 22 % курящей молодежи считает, что таким образом они «следуют модным тенденциям»; 14 % респондентов подвержены влиянию круга общения: молодые люди не хотят быть «белыми воронами» в компании курящих сверстников; столько же считает, что курение способствует поднятию настроения.

Отмечено, что 66 чел. из 69 респондентов считает необходимым придерживаться здорового образа жизни, среди них все некурящие (33 чел.) и 33 курящих студента (92 %). Ответы на вопрос, «что Вы лично делаете для сохранения и укрепления своего здоровья?» среди курящих студентов распределились следующим образом: большинство студентов ответили, что придерживаются правильного питания и здорового сна (более 30 %), 24 % занимаются спортом, 15 % принимают биологически активные добавки (БАДы).

Содержание макро- и микроэлементов в волосах молодых людей. Оценка соответствия содержания химических элементов в волосах студентов референсным значениям. При проведении исследования в волосах молодых людей были выявлены многие химические элементы. Концентрации Cd и Hg были ниже предела чувствительности прибора и не выходили за пределы референсных норм. Концентрация Pb в волосах большинства обследованных была ниже чувствительности прибора (92,8 %), для 5,8 % – концентрация Pb в волосах определялась и была ниже референсных норм. В волосах 1 человека – курящего юноши – концентрация свинца вышла за пределы верхнего биологически допустимого уровня (5 мг/кг).

В табл. 2 представлены данные о концентрациях химических элементов в волосах молодых людей, участвовавших в исследованиях, в сравнении с референсными значениями.

Таблица 2

Содержание химических элементов в волосах молодых людей ($n = 69$), мг/кг

Table 2

Content of chemical elements in the hair of students ($n = 69$), mg/kg

Элемент	Min-Max Me P 25–75	Референсные значения [12–14]	
		минимум	максимум
Ca	219,92–4579,36 881,82 442,36 – 1986,41	300	1000; 1700
Zn	70,81–448,11 136,31 118,65–201,21	114	320
Fe	4,57–47,79 13,40 7,67–21,91	13	35
Cu	2,93–101,75 8,32 5,66–12,63	9	30
Mn	0–27,49 0,92 0–1,66	0,5	2
Cr	0,92–2,34 1,72 1,58–2,01	0	5

Примечания. n – объем выборки, min-max – минимальные и максимальные значения выборки, Me – медиана. P 25–0,75 – процентиля. Референсные значения для Ca представлены с учетом половых различий (первое значение – для юношей, второе – для девушек).

Notes. n – sample size, min-max – minimum and maximum sample values, Me – median. P 25–75 – percentiles. Reference values for Ca are presented taking into account gender differences (the first value is for boys, the second value is for girls).

Установлено, что медианные значения концентраций Ca, Fe, Zn, Mn и Cr в волосах девушек и юношей находятся в пределах референсных значений. Медианные значения концентраций Cu ниже референсных значений. Однако для Ca, Fe, Zn, Mn и Cu также наблюдаются значения как выше, так и ниже референсных.

В табл. 3 представлены данные об элементном статусе девушек с учетом статуса в отношении курения.

Таблица 3

Содержание химических элементов в волосах девушек, мг/кг

Table 3

Content of chemical elements in girls' hair, mg/kg

Элемент	Min-Max Me P 25-75		Референсные значения ¹ [12-13]	
	Курящие девушки, n = 15	Некурящие девушки, n = 12	минимум	максимум
Ca	778,82–3378,21 2452,92 1779,20–3142,94	486,92–4579,35 2031,29 1235,63–2967,81	300	1700
Fe	5,00–30,82 9,71 7,4917,73	6,40–16,71 13,11 8,26–14,42	13	35
Cu	2,926–41,91 11,78 8,65–14,79	2,97–45,61 8,26 5,42–16,15	9	30
Cr	1,65–2,02 1,81 1,67–1,97	0,97–1,84 1,69 1,47–1,79	0	5
Mn	0–2,07 0,83 0,69–1,22	0–2,976667 0,67 0,31–1,64	0,5	2
Zn	80,18–409,62 136,66 118,24–263,16	85,80–448,11 198,23 125,85–413,42	114	320

В целом, медианы концентраций по всем исследованным элементам в волосах у курящих и некурящих девушек не имели статистических различий ($p > 0,05$). Медиана концентрации кальция в волосах курящих девушек незначимо ($p = 0,391$) выше в 1,2 раза, чем некурящих девушек; Cu – в 1,4 раза ($p = 0,516$); Cr – в 1,1 раза ($p = 0,153$); Mn – в 1,2 раза ($p = 0,775$). В волосах курящих девушек медиана концентрации Fe в 1,4 раза ($p = 0,979$), Zn в 1,5 раза ($p = 0,242$) ниже по сравнению с показателями некурящих девушек.

В табл. 4 представлены данные о содержании химических элементов в волосах юношей с учетом статуса в отношении курения.

В целом медианы концентраций по всем исследованным элементам в волосах у курящих и некурящих юношей не имели статистических различий ($p > 0,05$). У курящих юношей содержание Cr (в 1,1 раза, $p = 0,098$), Mn (в 1,6 раза, $p = 0,132$), Zn (в 1,02 раза, $p = 0,331$) выше и Cu (в 1,4 раза, $p = 0,07$), Fe (в 1,04 раза, $p = 0,884$) ниже по сравнению с показателями некурящих юношей.

Выходящие за границы нормы частоты значений концентраций макро- и микроэлементов в волосах молодых людей представлены в табл. 5.

¹Метод гигиенической оценки баланса химических элементов у детей (региональный микроэлементный паспорт). Инструкция по применению № 015-1112. Утверждена постановлением главного государственного врача Республики Беларусь 2012.12.12. Минск: Минздрав, 2012. 19 с.

Таблица 4

Содержание химических элементов в волосах юношей, мг/кг

Table 4

Content of chemical elements in boys' hair, mg/kg

Элемент	Min-Max Ме P 25–75		Референсные значения ² [12–13]	
	Курящие юноши, n = 21	Некурящие юноши, n = 21	минимум	максимум
Ca	143,02–4897,21 524,04 411,22–723,46	219,92–4147,21 526,58 401,04–881,81	300	1000
Fe	5,31–42,96 13,99 7,67–25,61	4,57–47,79 14,57 9,45–22,75	13	35
Cu	2,98–101,75 6,37 5,28–8,58	5,06–23,15 8,98 6,38–11,58	9	30
Cr	1,36–2,34 1,82 1,60–2,19	0,92–2,193 1,67 1,30–1,91	0	5
Mn	0,00–27,49 1,36 0,18–2,69	0,00–1,81 0,83 0–1,36	0,5	2
Zn	84,40–242,05 136,52 123,05–177,39	111,94–260,86 133,83 114,76–148,62	114	320

Таблица 5

Распространенность дефицита и избытка химических элементов в волосах молодых людей, %

Table 5

Prevalence of deficiency and excess of chemical elements in the hair of young people, %

Элемент	Статус	Юноши		Девушки	
		курящие	некурящие	курящие	некурящие
Ca	недостаток	9,5 ± 4,5*	4,6 ± 1,7*	0,0	0,0
	норма	76,2 ± 4,5	68,2 ± 4,7	13,3 ± 6,7*	41,7 ± 18,8*
	избыток	14,3 ± 4,5*	27,3 ± 4,7*	86,7 ± 16,8	58,3 ± 18,8
Cu	недостаток	76,2 ± 5,1	50,0 ± 0,0	26,7 ± 4,1	50,0 ± 4,1
	норма	19,1 ± 5,1	50,0 ± 0,0**	60,0 ± 4,1	33,3 ± 4,1 **
	избыток	4,8 ± 4,0**	0,0	13,3 ± 4,1* **	16,7 ± 4,1*
Fe	недостаток	47,6 ± 4,5**	40,9 ± 3,5**	60,0 ± 0,0**	41,7 ± 0,0**
	норма	47,6 ± 4,5* **	50,0 ± 3,5* **	40,0 ± 0,0**	58,3 ± 0,0**
	избыток	4,8 ± 4,1*	9,1 ± 3,5*	0,0	0,0
Mn	недостаток	19,1 ± 2,9* **	18,2 ± 0,0* **	6,7 ± 5,1* **	16,7 ± 5,1* **
	норма	52,4 ± 2,9	81,8 ± 0,0**	86,7 ± 7,1*	66,7 ± 5,1* **
	избыток	28,6 ± 2,9	0,0	6,7 ± 5,1*	16,7 ± 5,1*
Zn	недостаток	19,1 ± 0,0* **	27,3 ± 0,0* **	26,7 ± 3,5* **	16,7 ± 4,1* **
	норма	81,0 ± 0,0*	72,7 ± 0,0* **	53,3 ± 3,5*	50,0 ± 4,1* **
	избыток	0,0**	0,0**	20,0 ± 3,5* **	33,3 ± 4,1* **

Примечания. * – наличие существенных различий ($p = 0,05$) между группами курящих и некурящих; ** – наличие существенных различий ($p = 0,05$) между группами курящих юношей и курящих девушек или некурящих юношей и некурящих девушек.
Notes. * – the presence of significant differences ($p = 0.05$) between the groups of smoking and non-smoking; ** – the presence of significant differences ($p = 0.05$) between the groups of boys and girls who smoke or boys and girls who do not smoke.

²Метод гигиенической оценки баланса химических элементов у детей (региональный микроэлементный паспорт). Инструкция по применению № 015-1112. Утверждена постановлением главного государственного врача Республики Беларусь 2012.12.12. Минск: Минздрав, 2012. 19 с.

Медианное значение концентраций кальция у девушек выше значений референсных норм, у юношей – оно входит в референсный диапазон значений. Кальций препятствует всасыванию в кишечнике и депонированию в организме токсинов и тяжелых металлов, поэтому адекватное потребление кальция важно для предотвращения поступления тяжелых металлов в организм. Среди курящих парней недостаток кальция встречается чаще в 2 раза ($p = 0,05$) и составляет 9,5 %. У всех обследованных девушек не выявлено недостатка кальция, однако, у курящих девушек содержание кальция в волосах в пределах референсных значений встречается в 3 раза реже ($p = 0,05$), чем у некурящих. Известно, что снижение содержания эстрогенов, связанное с их повышенным разрушением в печени, является одним из основных механизмов развития остеопороза у курильщиков. Остеобласты становятся менее чувствительны к тиреокальцитонину и более – к паратгормону, в результате чего способность усваивать кальций костной тканью снижается, а выведение его в плазму крови – повышается. Таким образом, повышенное содержание кальция в волосах может быть связано не только с его избыточным употреблением, но и стать результатом его усиленного обмена: повышенные концентрации кальция из плазмы крови выводятся в волосы. Считается, что содержание кальция, как и других элементов, именно в волосах, в отличие от других биологических субстратов (моча, кровь), позволяет диагностировать хронические нарушения обмена элемента в организме. Однако для утверждения о влиянии курения на усвоение кальция в организме и его обмен требуется проведение дополнительных исследований по изучению вопросов, связанных с поступлением кальция с пищей и обеспеченностью витамином D, одной из причин нарушения обмена которого также является курение.

Медь входит в состав многих витаминов, ферментов, гормонов, участвует в процессах кроветворения, обмена веществ и клеточного дыхания, синтезе соединительной ткани и пигмента меланина, передаче нервных импульсов, регуляции окислительно-восстановительных процессов, поддерживает нормальную структуру костей, хрящей и сухожилий, так как входит в состав белка коллагена, участвует в поддержании эластичности стенок кровеносных сосудов и кожи, поскольку входит в состав белка эластина, участвует в регуляции углеводного и белкового обменов. Среди курящих девушек избыток меди составляет 13 %, что в 3 раза чаще ($p = 0,05$), чем у курящих юношей. Среди курящих парней избыток меди составляет 4,8 %, в то время как среди некурящих избыток меди не встречается. В литературе отмечается, что, несмотря на то что медь относится к эссенциальным микроэлементам, ее избыточное содержание (превышение референсных норм) в организме весьма токсично для человека и может вызывать аллергические реакции, выпадение волос, поражение почек и нервной системы, нарушение менструального цикла, поражение головного мозга, снижать усвоение организмом железа, кобальта, цинка, молибдена, витамина А. Медь присутствует в табаке и в процессе курения может содержаться в табачном дыме, попадать в организм человека в виде аэрозоля в биологически и химически активной форме, а также обнаруживаться с течением времени в избытке в различных органах (хрусталик глаза [8]). Однако избыток меди в организме может быть связан и с другими факторами, изучение которых в рамках данных исследований не проводилось: загрязнением окружающей среды, приемом лекарственных средств (оральные контрацептивы, гормональные средства, препараты кортизона), способствующих усиленному выведению меди из организма, избыточное содержание которой может быть как раз и обнаружено в волосах. Нормальное содержание меди наблюдается у 50 % некурящих юношей и 33 % некурящих девушек. У некурящих юношей нормальное содержание меди встречается в 1,5 раза чаще, чем у некурящих девушек. Недостаток меди в организме характерен для 76,2 % курящих юношей и 26,7 % курящих девушек.

Медианное значение концентрации железа у курящих девушек ниже значений референсных норм. Избыток железа не наблюдается у девушек обеих групп, а недостаток встречается чаще, чем у юношей (в 1,02–1,3 раза, $p = 0,05$), что логично, так как известно, что в силу физиологических особенностей у женщин расход и потеря железа больше, чем у мужчин. Однако в группе курящих девушек недостаток более глубокий и встречается чаще. Нормальное содержание железа наблюдается у 50 % некурящих юношей и 58 % некурящих девушек, а у курящих юношей нормальное содержание железа встречается у 47,6 % (в 1,1 раза ($p = 0,05$) реже, чем у курящих юношей) и у 40 % курящих девушек (в 1,2 раза ($p = 0,05$) реже, чем у курящих юношей).

Медианные значения концентраций марганца у всех рассматриваемых групп входят в диапазон значений референсных норм. Среди курящих юношей избыток марганца составляет 29 %, в то время как среди некурящих избыток данного элемента не наблюдается. Избыточное содержание марганца может приводить к поражению центральной нервной системы. Наблюдается вялость, утомляемость, сонливость, заторможенность, ухудшение памяти, депрессия, нарушения мышечного тонуса, деформация костей, нервные расстройства. В больших количествах марганец может поражать легкие, сердечно-сосудистую систему, вызывать аллергический и мутагенный эффекты. Нормальное содержание марганца наблюдается в 1,2 раза ($p = 0,05$) у некурящих юношей (82 %), чем у некурящих девушек (67 %). Дефицит марганца может приводить к снижению памяти и скорости реакции, спазмам и судорогам, болям в мышцах,

двигательным расстройством, деформации скелета, дегенеративным изменениям соединительной ткани и развитию остеопороза. При длительном дефиците марганца могут наблюдаться нарушения пигментации кожи, витилиго (нарушение синтеза меланина), уменьшение толерантности к глюкозе, гипохолестеринемия, нарастание избыточного веса, аллергии, провоцирует постоянную слабость, усталость и раздражительность. Недостаток Mn чаще встречался у юношей, причем в группе курящих юношей недостаток данного элемента был более выражен: недостаток Mn наблюдался в 1,05 раза чаще ($p = 0,05$) по сравнению с группой некурящих юношей и в 2,9 раза чаще ($p = 0,05$) – по сравнению с группой курящих девушек.

Медианные значения концентраций цинка у всех рассматриваемых групп входят в диапазон значений референсных норм. Среди курящих девушек недостаток цинка (26 %) встречается чаще, чем среди некурящих девушек (в 1,6 раз, $p = 0,05$) и курящих юношей (в 1,4 раза, $p = 0,05$). В зависимости от степени дефицита и его длительности, а также адаптационных возможностей организма человека симптомы и последствия недостатка цинка могут быть различными: со стороны кожных покровов, работы центральной нервной, иммунной систем. Кроме того, недостаток цинка способствует накоплению в организме железа, меди, кадмия, свинца в избыточных количествах.

Медианные значения концентраций хрома у всех рассматриваемых групп входят в диапазон значений референсных норм. Недостатка и избытка данного элемента, согласно используемым референсным нормам, не наблюдается.

Заключение

Среди 69 молодых людей МГЭИ им. А. Д. Сахарова было проведено анкетирование и отобраны пробы волос курящих (15 девушек и 21 юноша) со стажем курения в основном от 1 до 3 лет и некурящих (12 девушек и 21 юноша) молодых людей в возрасте 18–22 лет. В волосах отсутствует метаболическая активность, в результате чего накопленные в них элементы позволяют судить об их поступлении в организм за продолжительный период времени. Из опроса установлено, что юноши предпочитают обычные табачные изделия (81 %), а девушки отдают предпочтение электронным сигаретам (80 %). Однако в жидкостях электронных сигарет содержится никотин, и существуют факты [5–7], в том числе заявления Всемирной организации здравоохранения [14], свидетельствующие, что электронные сигареты вредны для здоровья и небезопасны. Понятие «курящие» рассматривали как собирательное, которое объединяет курильщиков классических сигарет и/или использующих электронные устройства. Количество сигарет, которое выкуривают молодые люди в день в среднем составляет 13 ± 1 штук/сутки (медиана – 12 штук/сутки). Количество «парений» (вдохов курительной смеси) у вейперов в среднем – 562 ± 25 вдохов/сутки (медиана – 525 вдохов/сутки). Причины курения расположились в следующий ряд: нервное перенапряжение (50 %) > «следование модным тенденциям» (22 %) > «влияние круга общения» = «для поднятия настроения» (14 %).

Концентрации элементов Cd и Hg были ниже предела чувствительности прибора и не выходили за пределы референсных норм. Концентрация Pb в волосах большинства обследованных была ниже чувствительности прибора (92,8 %), для 5,8 % – концентрация Pb в волосах определялась и была ниже референсных норм. В волосах человека – курящего юноши – концентрация свинца вышла за пределы верхнего биологически допустимого уровня (5 мг/кг).

Медианы концентраций Cr, Zn, Mn находились в диапазоне референсных норм. А медианы концентраций Ca в волосах девушек – выше референсных значений, Fe – в волосах курящих девушек и Cu – в волосах курящих юношей – ниже референсных норм.

В целом, медианы концентраций по всем исследованным элементам в волосах у курящих и некурящих молодых людей не имели статистических различий ($p = 0,05$). Однако медиана концентрации кальция в волосах курящих девушек незначимо ($p = 0,391$) выше в 1,2 раза, чем некурящих девушек; Cu – в 1,4 раза ($p = 0,516$); Cr – в 1,1 раза ($p = 0,153$); Mn – в 1,2 раза ($p = 0,775$) выше. В волосах курящих девушек медиана концентрации Fe в 1,4 раза ($p = 0,979$), Zn в 1,5 раза ($p = 0,242$) ниже по сравнению с показателями некурящих девушек. У курящих юношей медиана содержания Cr (в 1,1 раза, $p = 0,098$), Mn (в 1,6 раза, $p = 0,132$), Zn (в 1,02 раза, $p = 0,331$) выше и Cu (в 1,4 раза, $p = 0,07$), Fe (в 1,04 раза, $p = 0,884$) ниже по сравнению с показателями некурящих юношей.

У курящих юношей чаще встречается недостаток кальция (в 2 раза, $p = 0,05$), меди (в 1,5 раза), железа (1,2 раза), марганца (в 1,05 раза, $p = 0,05$) и избыток меди (на 4,8 %), марганца (на 28,6 %), чем у некурящих сверстников, у которых содержание меди в 2,6 раза, железа в 1,1 раза ($p = 0,05$), марганца – в 1,6 раза чаще находятся в диапазоне референсных значений. У курящих девушек чаще (в 1,5 раза) встречается избыток кальция, недостаток железа (1,4 раза) и цинка (в 1,6 раза, $p = 0,05$), чем у некурящих ровесниц, у которых концентрации кальция в 3 раза ($p = 0,05$), а железа в 1,5 раза чаще находятся в диапазоне референсных значений. Курящие девушки значимо ($p = 0,05$) чаще имеют дисбаланс таких элементов, как Cu (избыток), Fe (недостаток), Zn (недостаток) по сравнению с курящими юношами.

Таким образом, даже непродолжительный период курения (до 3-х лет) может оказывать влияние на биоэлементный статус молодых людей, значимо ($p = 0,05$) увеличивая частоту встречаемости недостатка Ca (в 2 раза), Mn (в 1,05 раза) и реже нормы Fe (в 1,1 раза) у юношей; увеличивая частоту встречаемости недостатка Zn (в 1,6 раза) и реже нормы Ca (в 3 раза) у курящих девушек. Хотя, несомненно, из-за наличия большого количества факторов, влияющих на поступление и метаболизм элементов в организме, неоднородности рассматриваемых групп по источнику поступления никотина, вопросы, кто больше подвержен дисбалансу биоэлементов (курящие юноши или девушки); какова роль курения в формировании микроэлементозов, требуют проведения дополнительных исследований (поступление элементов с пищей, обеспеченность витаминами, прием лекарственных средств, наличие заболеваний и т. д.).

Проведенные исследования расширяют теоретические представления о содержании макро- и микроэлементов в организме курящих и некурящих в возрасте 18–22 лет. Полученные данные о содержании макро- и микроэлементов в организме молодых людей необходимы для своевременной коррекции биоэлементного статуса молодежи, сохранения и укрепления их здоровья, а также пропаганды здорового образа жизни.

Библиографические ссылки

1. Чижова ТВ. Курение и показатели здоровья рабочих. *Гигиена и санитария*. 1990;1:55–57.
2. Румянцев АШ, Лындина МЛ, Шишкин АН. Курение и почки. *Нефрология*. 2018;22(1):9–28.
3. Pan A, Wang Y, Talaei M, B Hu F, Wu T. Relation of active, passive, and quitting smoking with incident type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis. *Lancet Diabetes & Endocrinology*. 2015;3(12):958–967.
4. Colombo ES, Davis J, Makvandi M, Aragon M, Lucas SN, Paffett ML, Campen MJ. Effects of nicotine on cardiovascular remodeling in a mouse model of systemic hypertension. *Cardiovascular toxicology*. 2013;13(4):364–369.
5. Golli NE, Jrad-Lamine A, Neffati H, Dkhili H, Rahali D, Dallagi Y, May MV, Faza S. Impact of e-cigarette refill liquid exposure on rat kidney. *Regulatory toxicology and pharmacology*. 2016;77:109–116.
6. Rubenstein DA, Hom S, Ghebrehiwet B, Yin W. Tobacco and e-cigarette products initiate Kupffer cell inflammatory responses. *Molecular immunology*. 2015;67(2Pt B):652–660.
7. Lauterstein DE, Tijerina PB, Corbett K, Oksuz BA, Shen SS, Gordon T, Klein CB, Zelikoff JT. Frontal cortex transcriptome analysis of mice exposed to electronic cigarettes during early life stages. *International journal of environmental research and public health*. 2016;13(4):417.
8. Матвейко НП, Брайкова АМ, Садовский ВВ. Содержание тяжелых металлов в дыме сигарет. *Вестник Витебского государственного технологического университета*. 2014;27:146–152.
9. Матвейко НП, Брайкова АМ, Садовский ВВ. Определение содержания тяжелых металлов в табаке сигарет и продуктах его сгорания. *Вестник Белорусского государственного экономического университета*. 2014;3:65–70.
10. Соломенчук ТМ, Зербино ДД, Топилко ОЮ. Ксенобиотики в сигаретах и сигаретном дыме: курение легких сигарет не снижает риск попадания в организм человека тяжелых металлов. *Украинский медицинский журнал*. 2003;4(36):130–133.
11. Матвейко НП, Протасов СК, Садовский ВВ. Определение тяжелых металлов в волосах человека. *Вестник Витебского государственного технологического университета*. 2013;25:95–98.
12. Скальная МГ, Демидов ВА, Скальный АВ. О пределах физиологического (нормального) содержания Ca, Mg, P, Fe, Zn и Cu в волосах человека. *Микроэлементы в медицине*. 2003;4(2):5–10.
13. Гресь НА, Скальный АВ, редакторы. *Биоэлементный статус населения Беларуси: экологические, физиологические и патологические аспекты*. Минск: Харвест; 2011. 352 с.
14. Табак: электронные сигареты. Вопросы и ответы [Интернет; процитировано 19 января 2024]. Всемирная организация здравоохранения. Доступно по: <https://www.who.int/ru/news-room/questions-and-answers/item/tobacco-e-cigarettes>.

References

1. Chizhova TV. *Kurenie i pokazateli zdorov'ya rabochikh* [Smoking and health indicators of workers]. *Gigiena i sanitariya* [Hygiene and sanitation]. 1990;1:55–57. Russian.
2. Rummyantsev AS, Lyndina ML, Shishkin AN. Smoking and kidneys. *Nephrology* (Saint-Petersburg). 2018;22(1):9–28. Russian.
3. Pan A, Wang Y, Talaei M, B Hu F, Wu T. Relation of active, passive, and quitting smoking with incident type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis. *Lancet Diabetes & Endocrinology*. 2015;3(12):958–967. DOI: 10.1016/S2213-8587(15)00316-2.
4. Colombo ES, Davis J, Makvandi M, Aragon M, Lucas SN, Paffett ML, Campen MJ. Effects of nicotine on cardiovascular remodeling in a mouse model of systemic hypertension. *Cardiovascular toxicology*. 2013;13(4):364–369. DOI: 10.1007/s12012-013-9217-z.
5. Golli NE, Jrad-Lamine A, Neffati H, Dkhili H, Rahali D, Dallagi Y, May MV, Faza S. Impact of e-cigarette refill liquid exposure on rat kidney. *Regulatory toxicology and pharmacology*. 2016;77:109–116. DOI: 10.1016/j.yrtph.2016.02.012.
6. Rubenstein DA, Hom S, Ghebrehiwet B, Yin W. Tobacco and e-cigarette products initiate Kupffer cell inflammatory responses. *Molecular immunology*. 2015;67(2 Pt B):652–660. DOI: 10.1016/j.molimm.2015.05.020.
7. Lauterstein DE, Tijerina PB, Corbett K, Oksuz BA, Shen SS, Gordon T, Klein CB, Zelikoff JT. Frontal cortex transcriptome analysis of mice exposed to electronic cigarettes during early life stages. *International journal of environmental research and public health*. 2016;13(4):417. DOI: 10.3390/ijerph13040417.
8. Matveiko NP, Braikova AM, Sadovskii VV. *Soderzhanie tyazhelykh metallov v dyme sigaret* [The content of heavy metals in cigarette smoke]. *Bulletin of the Vitebsk State Technological University*. 2014;27:146–152. Russian.

9. Matveiko NP, Braikova AM, Sadovskii VV Determination of heavy metal content in tobacco cigarettes and its combustion products. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian State University of Economics]. 2014;3:65–70. Russian.
10. Solomenchuk TM, Zerbino DD, Topilko OU Xenobiotics in cigarettes and cigarette smoke: light cigarettes smoking do not minimize a risk of getting in organism heavy metals. *Ukrainskii meditsinskii zhurnal* [Ukrainian Medical Journal]. 2003;4(36):130–133. Ukrainian.
11. Matveiko NP, Protasov SK, Sadovskii VV. *Opreделение tyazhelykh metallov v volosakh cheloveka* [Determination of heavy metals in human hair]. *Bulletin of the Vitebsk State Technological University*. 2013;25:95–98. Russian.
12. Skalnaya MG, Demidov VA, Skalny AV. *O predelakh fiziologicheskogo (normal'nogo) sodержaniya Sa, Mg, P, Fe, Zn i Cu v volosakh cheloveka* [About the limits of physiological (normal) content of Ca, Mg, P, Fe, Zn and Cu in human hair]. *Microelements in medicine*. 2003;4(2):5–10. Russian.
13. Gres NA, Skalny AV, editors. *Bioelementnyi status naseleniya Belarusi: ekologicheskie, fiziologicheskie i patologicheskie aspekty* [Bioelement status of the population of Belarus: ecological, physiological and pathological aspects]. Minsk: Harvest; 2011. 352 p. Russian.
14. Tobacco: E-cigarettes. Questions and answers [Internet, cited 2024 January 19]. World Health Organization. Available from: <https://www.who.int/ru/news-room/questions-and-answers/item/tobacco-e-cigarettes>.

Статья поступила в редакцию 21.02.2025.
Received by editorial board 21.02.2025.

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

УДК 665.334.93+631.95

АНАЛИЗ ПРИЕМОВ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА МАСЛОСЕМЯН РАПСА И ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ

О. Л. ЛОМОНОС¹⁾, М. М. ЛОМОНОС²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. Петруся Бровки, 6, 220013, г. Минск, Беларусь

²⁾Иностранное общество с ограниченной ответственностью «Рапуль Бел»,
ул. Рождественская, 5А, 223043, д. Цнянка, Минский р-н, Минская обл., Беларусь

Проанализированы основные тенденции и особенности производства маслосемян рапса (озимого и ярового) в разрезе его ключевых составляющих за 2019–2023 гг. Приведены результаты сравнительного анализа статистических данных Национального статистического комитета Республики Беларусь за пятилетний период по посевным площадям рапса и уровню его продуктивности, а также объемам внесения минеральных удобрений под данную культуру. С учетом проанализированной научно-статистической информации предлагается перспективный, экологически безопасный и экономически оправданный путь дальнейшего увеличения валового сбора маслосемян за счет расширения посевных площадей непосредственно под гибридами рапса. В Республике Беларусь на протяжении 2019–2023 гг. наблюдается рост посевных площадей под озимым и яровым рапсом. Площадь его возделывания за исследуемый период увеличилась на 71 тыс. га и в 2023 г. составила 495 тыс. га с удельным весом в структуре посевов 8,6 %. Рост валового сбора семян рапса до 899 тыс. т отмечается за счет увеличения количества применяемых минеральных

Образец цитирования:

Ломонос ОЛ, Ломонос ММ. Анализ приемов увеличения производства маслосемян рапса и их экологическая составляющая. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;1:67–76.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-67-76>

For citation:

Lamanos VL, Lamanos MM. Analysis of methods for increasing the production of rapeseed oilseeds and their environmental component. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;1:67–76. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-67-76>

Авторы:

Ольга Леонидовна Ломонос – кандидат сельскохозяйственных наук; доцент кафедры инженерной психологии и эргономики факультета компьютерного проектирования.
Михаил Михайлович Ломонос – кандидат сельскохозяйственных наук; заместитель директора.

Authors:

Volha L. Lamanos, PhD (agriculture); associate professor at the department of engineering psychology and ergonomics, faculty of computer design.
volha.lamanos@gmail.com
Mikhail M. Lamanos, PhD (agriculture); deputy director.
lomonos_mikhail@mail.ru

удобрений на 35 %, достигнув уровня 329 кг/га д. в. NPK. В результате анализа урожайности маслосемян рапса в зависимости от удельного веса гибридов в структуре посевных площадей установлена достоверная корреляционная связь повышения урожайности с 16,8 до 23,1 ц/га по мере увеличения доли гибридов с 24 % в 2019 г. до 49 % в 2023 г., используемых для посева. Возделывание гибридов озимого и ярового рапса позволяет экономить азотные удобрения за счет их эффективного использования современными гибридами. Уровень экономии может составлять около 7–8 кг/га д. в. азота или 17,2–19,6 бел. руб. на 1 га в денежном выражении по ценам на 01.11.2024 г.

Ключевые слова: озимый и яровой рапс; продуктивность; минеральные удобрения; гибриды рапса; экология; окружающая среда.

ANALYSIS OF METHODS FOR INCREASING THE PRODUCTION OF RAPESEED OILSEEDS AND THEIR ENVIRONMENTAL COMPONENT

V. L. LAMANOS^a, M. M. LAMANOS^b

^aBelarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6 Petrusia Broŭki Street, 220013 Minsk, Belarus

^bForeign limited liability company «Rapool Bel»,
5A Razhdestvenskaya Street, Tsnianka 223043, Minsk district, Minsk region, Belarus
Corresponding author: V. L. Lamanos (volha.lamanos@gmail.com)

The article analyzes the main trends and features of the production of rapeseed oilseeds (winter and spring) in the context of its key components for the period 2019–2023. The results of a comparative analysis of statistical data from the National Statistical Committee of the Republic of Belarus for a five-year period on the area of rapeseed and the level of its productivity, as well as the volume of mineral fertilizers applied to this crop are presented. Taking into account the analyzed scientific and statistical information, a promising, environmentally safe and economically viable way to further increase the gross harvest of rapeseed oilseeds by expanding the acreage directly under rapeseed hybrids is proposed. In the republic during 2019–2023 there is an increase in the area under winter and spring rapeseed. The area of rapeseed during the study period increased by 71 thousand hectares and in 2023 amounted to 495 thousand hectares under a specific weight in the structure of crops of 8.6 %. An increase in the gross harvest of rapeseed to 899 thousand tons is also noted due to an increase in the amount of mineral fertilizers used by 35 %, reaching a level of 329 kg/ha a. i. NPK. As a result of the analysis of the yield of rapeseed oilseeds depending on the proportion of hybrids in the structure of sown areas, a reliable correlation was established between an increase in yield from 16.8 to 23.1 dt/ha as the share of hybrids used for sowing increased from 24 % in 2019 to 49 % in 2023. Cultivation of hybrids of winter and spring rape allows saving nitrogen fertilizers due to their effective use by modern hybrids. The level of savings can be about 7–8 kg/ha a.i. nitrogen or 17.2–19.6 Belarusian rubles per 1 ha in monetary terms at prices as of November 1, 2024.

Keywords: winter and spring rapeseed; productivity; mineral fertilizers; rapeseed hybrids; ecology; environment.

Введение

Актуальность проблемы повышения эффективности возделывания рапса predetermined тем, что последние три десятилетия он является основной масличной культурой мирового земледелия. Для климатических условий Беларуси возделывание рапса как культуры универсального типа использования приобрело первостепенное значение: для устранения дефицита в пищевых растительных жирах за счет отечественного производства рапсового масла, а также получения биотоплива. Параллельно производство семян рапса способствует обеспечению животноводства высокобелковыми и жиросодержащими кормами за счет побочных продуктов перерабатывающей промышленности – рапсового жмыха и шрота [1]. Немаловажное значение занимает и экспортная составляющая продукции рапсового подкомплекса.

Для удовлетворения потребностей населения республики в растительных жирах ежегодно необходимо производить 120–140 тыс. т растительного масла, где на долю рапсового масла приходится 85–90 тыс. т [2]. Одна тонна маслосемян рапса при ее переработке способна сбалансировать по белку и иным веществам несколько тонн других кормов. Продукты переработки семян рапса – жмыхи и шроты содержат 30–40 % белка, сбалансированного по аминокислотному составу. В 100 кг шрота содержится до 90 корм. ед. Рапсовый шрот превосходит подсолнечный по переваримости органических веществ и по содержанию незаменимых аминокислот – лизина на 33 %, цистина в 2,1 раза [3]. За последние годы (2019–2023 гг.) производство рапсового масла стало одним из важных источников поступления валютной выручки в экономику АПК Республики Беларусь [4].

Кроме очевидных экономических преимуществ, рапс имеет экологические и агротехнические плюсы. Так, 1 га хорошо развитых побегов озимого рапса выделяет в атмосферу 10–11 млн л кислорода, уступая в этом только сахарной свекле. Еще один экологический плюс связан с тем, что рапс представляет собой отличное средство рекультивации радиоактивного заражения почв. Или взять другое направление – рапс для производства биодизеля. Для сравнения, 1 л дизельного топлива выделяет в атмосферу 3 кг CO₂, а 1 л биодизеля – 0,5 кг. Помимо этого, 1 га рапса в течение вегетации поглощает 22 т CO₂, которые образуются при сжигании 6,5–7,0 т дизельного нефтяного топлива. Маслосемена рапса также накапливают значительное количество энергии, что в 2,25 раза больше, чем расходуется на его производство. Для сравнения у сахарной свеклы этот показатель равен 1,63, у кукурузы – 1,28, у пшеницы – 1,14, у картофеля – 1,04 [5].

Несмотря на то что в настоящее время в стране наблюдается рост посевных площадей озимого и ярового рапса, проблема самообеспечения растительным маслом и кормовым белком остается актуальной. Имеющийся потенциал в возделывании данной культуры реализуется не полностью. Из года в год колеблются посевные площади, а уровень урожайности не достигает потенциально возможного. Необходимость увеличения объемов производства рапса обусловлена, с одной стороны, потребностью обеспечения пищевой промышленности страны сырьем, а отечественного животноводства – кормовым белком. Пока выращиваемые объемы позволяют загрузить производство лишь частично, вследствие чего некоторые предприятия вынуждены простаивать либо осуществлять закупки сырья в близлежащих странах [6]. С другой стороны, наращивание объемов производства маслосемян рапса обусловлено ростом спроса на растительное масло на внешних рынках для продовольственных и промышленных целей.

Безусловно, успех в возделывании рапса как и любой другой сельскохозяйственной культуры заключается в качественном и своевременном выполнении всех технологических операций: дифференцированная основная обработка почвы в зависимости от предшественника, использование высокопродуктивных гибридов, соблюдение технологии посева в оптимальные сроки, интегрированная система защиты рапса в течении всего вегетационного периода, рациональная система удобрения, включающая дифференцированное применение азотных удобрений, исключая непроизводительные потери [7–10]. Цель исследования: провести сравнительный анализ научно-статистической информации по производству маслосемян рапса в Республике Беларусь за период 2019–2023 гг. и определить потенциально возможные и экологически безопасные пути увеличения его производства.

Материалы и методы исследования

Предмет и объект исследования – рапс (озимый, яровой) и пути увеличения его производства.

Метод исследований – системный анализ с применением общепринятых методик обработки данных.

Информационной базой исследования служили отраслевые справочно-нормативные материалы, рекомендации и результаты экспериментов специализированных отечественных и зарубежных научно-исследовательских учреждений.

При проведении исследований использовали данные Национального статистического комитета Республики Беларусь [11], Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, ГУ «Государственная инспекция по испытанию и охране сортов растений» во всех категориях хозяйств республики за 2019–2023 гг. [12; 13]:

- посевные площади рапса (озимого и ярового), тыс. га;
- валовый сбор и урожайность рапса (озимого и ярового), ц/га;
- внесение минеральных удобрений (в пересчете на 100 % питательных веществ), кг/га д. в. NPK;
- сортовой состав посевных площадей рапса.

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно данным Национального статистического комитета Республики Беларусь за 2019–2023 гг., в стране наблюдается рост посевных площадей озимого и ярового рапса (табл. 1). В 2023 г. площадь его возделывания в целом по республике по сравнению с 2019 г. увеличилась на 71 тыс. га или 16,7 %, а доля в структуре посевов выросла с 7,3 до 8,6 %. Это способствовало росту валового сбора маслосемян, который в 2023 г. достиг уровня в 899 тыс. т при урожайности 23,1 ц/га. Безусловно, уборочная площадь рапса меньше посевной, что вызвано потерей площадей в основном в результате влияния погодных-климатических условий в период перезимовки озимого рапса и в течение вегетации озимого и ярового рапса, а также других производственных факторов. И если оценить долю рапса, который подлежит уборке, к общей посевной площади, то она несколько ниже. В нашем случае в зависимости от года составляла 6,2–6,9 %. Поэтому важной задачей увеличения производства маслосемян является повышение сохранности растений рапса к уборке.

Таблица 1

Динамика основных показателей производства рапса (озимого и ярового) во всех категориях хозяйств Республики Беларусь

Table 1

Dynamics of the main indicators of rapeseed production (winter and spring) in all categories of farms in the Republic of Belarus

Годы	Посевная площадь, тыс. га	Уборочная площадь, тыс. га	Удельный вес в структуре посевных площадей, %	Валовый сбор, тыс. т	Урожайность, ц/га
2023	495	395	8,6	899	23,1
2022	451	383	7,8	806	21,3
2021	416	390	7,2	715	19,0
2020	410	364	7,0	733	20,6
2019	424	363	7,3	578	16,8

Следует отметить, что увеличение валового сбора за счет расширения площадей потенциально в будущем может вызвать рост себестоимости производства, так как почвенно-климатические условия Беларуси не позволяют возделывать рапс на всех посевных площадях, что увеличит его удельный вес в структуре посевов. Это повысит риски роста инфекционной нагрузки в севообороте, что в конечном счете потребует более интенсивного применения средств защиты растений, увеличит себестоимость производства, а также риски загрязнения окружающей среды, вызванные более частым использованием пестицидов.

С увеличением посевных площадей рапса в исследуемый период отмечается повышение объемов применения минеральных удобрений под данную культуру (рис. 1).

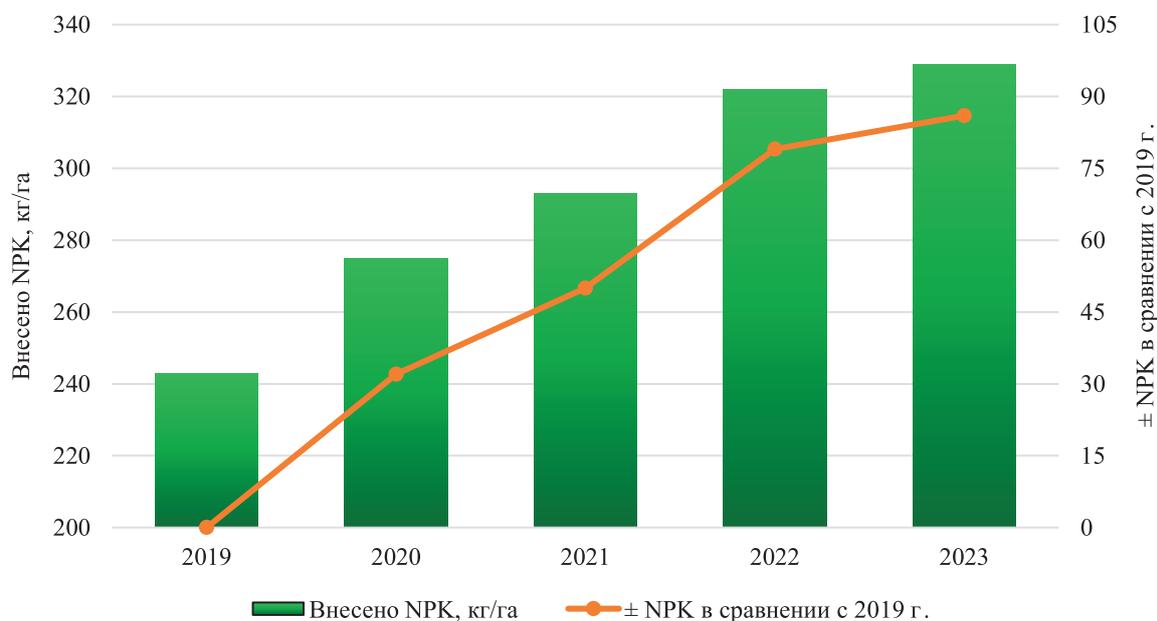


Рис. 1. Динамика применения минеральных удобрений под рапс (озимый и яровой) в Беларуси за период 2019–2023 гг., кг д. в./га

Fig. 1. Dynamics of the application of mineral fertilizers for rapeseed (winter and spring) in Belarus for the period 2019–2023, kg a. i./ha

Так, с 2019 по 2023 гг. количество применяемых минеральных удобрений увеличилось на 86 кг/га д. в. NPK или 35 %, достигнув уровня 329 кг/га д. в. NPK, что также способствовало повышению продуктивности маслосемян рапса. Однако здесь необходимо отметить, что у данного процесса есть предел, как экономический, то есть окупается ли применение высоких доз удобрений прибавкой урожайности или нет, так и экологический, поскольку применение удобрений и других средств химизации – это весьма активное влияние на природную среду.

Учитывая тот факт, что сельскохозяйственные культуры (в среднем) в первый год действия усваивают из удобрений 15–20 % фосфора, 50–60 % калия, 60–70 % азота [14], а ряд исследователей отмечают, что при высоких уровнях внесения удобрений эффективность использования азота на озимом рапсе

может снижаться и колеблется от 50 до 60 % [15]. Серьезной проблемой в производстве рапса является значительный избыток минерального питания и в первую очередь азота, особенно в фазу полной спелости [16; 17], что оказывает неблагоприятное влияние на окружающую среду из-за увеличения потерь азота за счет выщелачивания и газообразных потерь [18].

Следовательно, повышение эффективности использования азотных и других минеральных удобрений – ключевой вопрос повышения производства маслосемян рапса, а также устойчивость этого производства в экологическом и экономическом аспектах.

Последние исследования указывают на более экологический безопасный путь увеличения производства маслосемян рапса – использование современных селекционных достижений. Правильное применение результатов генетики и селекции может стать важным шагом на пути к повышению его урожайности и эффективности использования азота и других элементов питания [16–17; 19–21].

По данным исследований, проведенных в Германии, по оценке влияния азотных удобрений на урожайность 30 гибридов озимого рапса была отмечена лишь небольшая разница в урожайности маслосемян между высоким и низким уровнем применения азотных удобрений [20].

В более поздних исследованиях R. Hnilička и J. Škeřík (2020 г.) установлена ведущая роль достижений селекции рапса в повышении эффективности использования элементов питания и в первую очередь азота [22]. Согласно проведенным расчетам на основании результатов исследований Ассоциации производителей и переработчиков масличных культур Чехии, современные гибриды озимого рапса с устойчивостью к вирусу пожелтения турнепса (TuYV) используют для формирования единицы урожая на 7–8 кг д. в. азота меньше, чем обычные сорта рапса и на 2–3 кг д. в. в сравнении с гибридами без устойчивости к указанному вирусу (рис. 2).

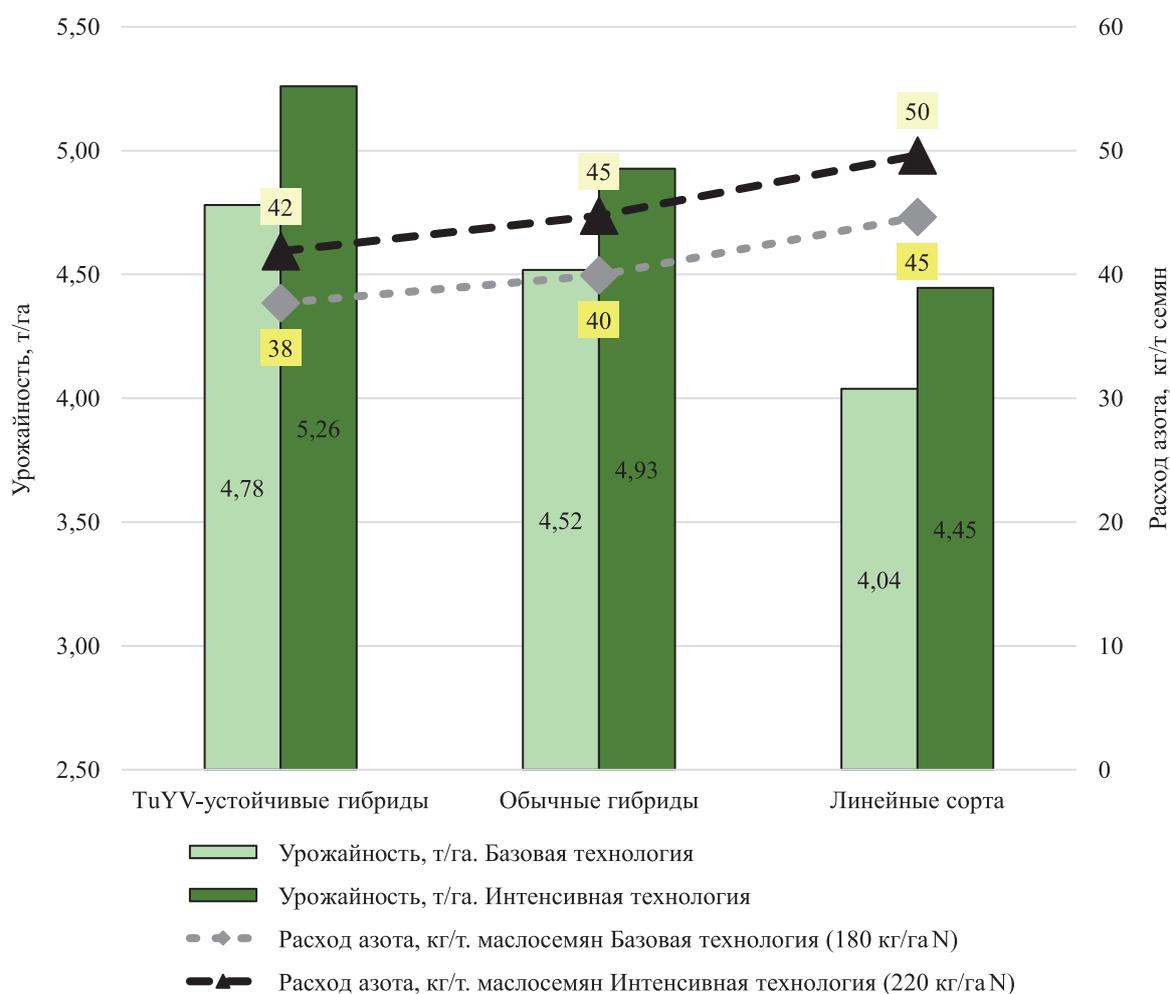


Рис. 2. Эффективность применения азотных удобрений на сортах и гибридах озимого рапса

Fig. 2. Efficiency of using nitrogen fertilizers on varieties and hybrids of winter oilseed rape

На основании данных результатов исследований экономия около 7–8 кг/га д. в. азота позволит снизить затраты при производстве маслосемян рапса на 17,2–19,6 бел. руб. на 1 га в денежном выражении по ценам на 01.11.2024 г.

Эти данные указывают, что с помощью современных методов селекции можно достигнуть не только устойчивости к болезни, но и на фоне этого снизить использование азотных удобрений и тем самым не потерять в продуктивности, а даже наоборот – увеличить ее и при этом снизить нагрузку на окружающую среду.

В последние годы наблюдается тенденция расширения посевных площадей под гибридами рапса, так как они обладают более интенсивным ростом и развитием, образуют больше стручков на растении, формируют более высокую урожайность зеленой массы и семян. Гибриды рапса характеризуются более высокими темпами роста и развития надземной массы растений и корневой системы на протяжении всего периода осенней вегетации, что позволяет им достичь оптимальных параметров развития растений за более короткий период времени и при меньшей сумме эффективных температур. При поздних сроках получения всходов культуры данная биологическая особенность позволяет гибридам сформировать потенциально более продуктивные и устойчивые к неблагоприятным условиям зимнего периода растения. Урожайность семян гибридов рапса, как правило, превышает урожайность сортов на 15% [23–24], а в условиях сельскохозяйственной организации СХФ «Красный май» ОАО «Минский завод игристых вин» Пуховичского р-на урожайность гибридов по сравнению с сортом была выше на 28–44 % [25], что в свою очередь в несколько раз окупает затраты на семена гибридов.

Использование гибридов рапса с устойчивостью к вредным патогенам является наиболее экономически выгодным и экологически безопасным способом увеличения производства маслосемян. Так, в исследованиях, проведенных в условиях Великобритании, потери урожая при возделывании гибридов рапса с устойчивостью к возбудителю *Leptosphaeria maculans* в среднем составили 3,0–5,9 ц/га, а гибридов без данной устойчивости – 3,9–7,9 ц/га, то есть на 0,9–2,0 ц/га выше [27]. Более поздними исследованиями 2017–2020 гг. James A. Fortune с соавторами [28], а также О. А. Сердюк, Л. А. Горловой (2020–2022 гг.) [26] установлено, что использование гибридов с повышенной устойчивостью к болезням при слабом или среднем уровне развития возбудителя *Leptosphaeria maculans* экономически и экологически более целесообразно, так как не требует применения триазольных фунгицидов, что снижает нагрузку на окружающую среду за счет полного отказа от применения средств защиты растений. Гибриды с устойчивостью к болезням также смягчают последствия изменения климата, увеличивают продуктивность рапса на единицу внесенных азотных удобрений, уменьшая при этом выбросы парниковых газов в атмосферу [27].

Серьезную угрозу для производства рапса в условиях изменения климата в сторону потепления представляют вирусные заболевания. Так, по оценкам специалистов, вирус пожелтения турнепса (TuYV – основное вирусное заболевание рапса) [29], вызывающий пожелтение, карликовость, покраснение листьев, межжилковый хлороз и задержку роста, может привести к значительным потерям урожая – от 11 до 46 % [30–32]. На сегодняшний день TuYV – одна из основных причин, по которой культура рапса не достигает своего генетического потенциала урожайности. Следует отметить, что в последние годы стали все чаще фиксироваться случаи развития данного заболевания в посевах озимого рапса на территории Беларуси. Важным способом защиты от болезни является применение инсектицидов с целью борьбы против основных переносчиков возбудителя болезни: различных видов тли и других сосущих вредителей, что в свою очередь приводит к увеличению применения средств защиты растений и является экологически небезопасным, повышая расходы на производство маслосемян и снижая при этом экономическую эффективность возделывания культуры. Все это актуализирует использование гибридов рапса с устойчивостью к вирусу пожелтения турнепса в наших условиях, поскольку является основной наиболее действенной, экологически целесообразной и экономически оправданной мерой [29–30; 33–34].

Проведенный анализ урожайности рапса в условиях Беларуси за 2019–2023 гг. в зависимости от удельного веса гибридов в структуре посевных площадей показывает достоверную корреляционную связь ($R^2 = 0,9189$) роста продуктивности рапса с увеличением доли гибридов, используемых для посева (рис. 3).

Так, с ростом использования высокопродуктивных гибридов рапса с 24 % в 2019 г. до 49 % в 2023 г. отмечен линейный рост его урожайности с 16,8 ц/га до 23,1 ц/га соответственно, что также способствовало увеличению производства маслосемян на 321 тыс. т к 2023 г.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что увеличить валовый сбор маслосемян рапса в дальнейшем в условиях Беларуси возможно в основном интенсивным путем. Так, по данным РУП «Институт почвоведения и агрохимии», в республике площадь почв, пригодных для возделывания озимого и ярового рапса, составляет до 2100 тыс. га – 41,9 % от общей площади пахотных земель [35]. С учетом требований севооборота (на одно и то же место рапс можно возвращать не ранее чем через 3–4 года) и пригодности пахотных почв можно ежегодно использовать под посеvy озимого и ярового рапса 420–525 тыс. га пашни (доля в структуре посевных площадей 8,4–10,5 %). В сельскохозяйственных организациях республики уровень освоения посевных площадей в 2023 г. составил 495 тыс. га, а доля рапса в структуре посевных площадей – 8,6 %, что свидетельствует об отсутствии возможности увеличить производство маслосемян за счет расширения посевных площадей. При этом ежегодная пригодная площадь пашни для возделывания рапса (озимого, ярового) в большинстве регионов Гомельской, Брестской,

Гродненской и Минской областей полностью освоена. Имеется возможность освоения пригодных почв для его выращивания лишь в Могилевской и Витебской областях. Эти регионы располагают наибольшим удельным весом (44,6–53,2 %) пригодных почв для возделывания рапса [36], но не в состоянии их освоить. Это связано с недостаточным количеством площадей рано убираемых предшественников для увеличения ежегодной посевной площади озимого рапса, а также более поздняя их уборка по сравнению с другими регионами, что создает высокую напряженность работ при подготовке полей для посева и вовремя его с целью осуществления работ в оптимальные сроки. Кроме того, для Витебской обл. характерна мелкоконтурность полей значительной территории, что усложняет посеять культуру в оптимальные сроки, а также избыточное переувлажнение в ранневесенний период, приводящее к гибели посевов на данных участках и тем самым исключая возможность возделывания озимого рапса.

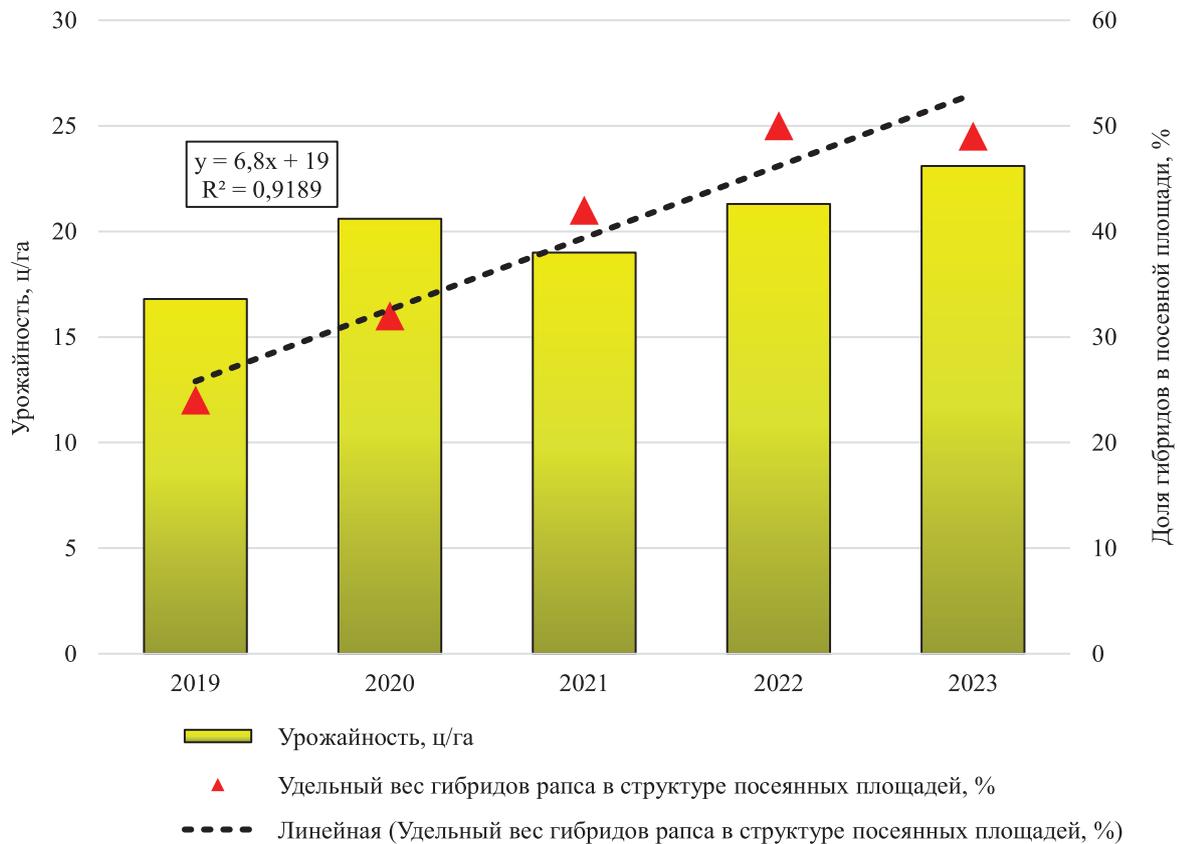


Рис. 3. Урожайность рапса в зависимости от удельного веса гибридов в структуре посевных площадей за период 2019–2023 гг.

Fig. 3. Rapeseed yield depending on the share of hybrids in the structure of sown areas for the period 2019–2023

Следует подчеркнуть, что в случае увеличения удельного веса рапса в структуре посевных площадей повысятся риски инфекционной нагрузки в севообороте, что в конечном счете потребует более интенсивного применения средств защиты растений, увеличит, соответственно, себестоимость производства, а также риски загрязнения окружающей среды из-за более частого использования пестицидов.

Наращивание валового сбора маслосемян за счет увеличения объемов применения минеральных удобрений в изменяющихся агроклиматических условиях должно быть экономически и экологически оправданным с учетом плодородия почв и планируемой урожайности.

Преимущественным путем интенсификации возделывания озимого и ярового рапса является использование для его посева гибридов, которые характеризуются устойчивостью к основным болезням данной культуры, а также рациональным использованием элементов питания при формировании урожая. Данный прием имеет как экономический аспект, позволяющий увеличить производство маслосемян, так и экологический, снижающий интенсивность применения средств защиты растений и минеральных удобрений за счет проведения меньшего количества химобработок и более эффективного использования азота и других элементов питания.

Заклучение

За пятилетний период (2019–2023 гг.) валовый сбор маслосемян рапса в Беларуси вырос на 321 тыс. т и достиг уровня 899 тыс. т за счет расширения посевных площадей до 495 тыс. га (при этом уборочная площадь составила 395 тыс. га) с удельным весом в структуре посевов 8,6 %, а также посредством увеличения объемов применения минеральных удобрений на 35 % (329 кг/га д. в. NPK) и расширением посевов под его гибридами до 49 % от общей посевной площади.

С учетом имеющихся мощностей перерабатывающих организаций Беларуси (около 2 млн т в год), в целях обеспечения населения страны пищевыми растительными жирами за счет производства отечественного рапсового масла и продуктов питания с его использованием, производства биотоплива, снабжения животноводства собственными высокобелковыми и жиросодержащими кормами в виде рапсового жмыха и шрота, а также увеличения экспорта растительных жиров необходимо наращивание производства маслосемян интенсивным путем. Главным образом, посредством более широкого использования под посевы озимого и ярового рапса высокопродуктивных, устойчивых к болезням, растрескиванию стручков, высокоадаптированных к изменяющимся агроклиматическим условиям с высоким содержанием масла гибридов. Как указывает мировая практика, увеличение гибридов рапса в структуре посевных площадей предполагает снижение нагрузки на окружающую среду за счет сокращения применения средств защиты растений ввиду устойчивости гибридов к основным болезням, а также более эффективного использования элементов питания на формирование единицы урожая.

Библиографические ссылки

1. Пиллюк ЯЭ. *Рапс в Беларуси: биология, селекция и технология возделывания*. Минск: Бизнесофсет; 2007. 240 с.
2. Пестис МВ. Состояние и пути повышения эффективности производства рапса в сельскохозяйственных организациях Республики Беларусь. *Сельское хозяйство – проблемы и перспективы*. 2018;43:215–221.
3. Дегтярев ИИ, Бондарович ЛА. *Организационно-экономические основы функционирования рапсoproдуктового подкомплекса АПК*. Гродно: ГГАУ; 2015. 153 с.
4. Оганезов ИА, Ловкис ЛК. Современное состояние, тенденции и перспективы развития рынка рапсового масла и основных продуктов его переработки. *Пищевая промышленность: наука и технологии*. 2024;2(64):13–22.
5. Старостина Л, Трофимов А. Масличное золото. Особенности возделывания и переработки рапса. *Агротехника и технологии*. 2022;1:17–28.
6. Радченко Н, Соколовская Е. Переработка рапса в Республике Беларусь: анализ тенденций и стратегические ориентиры развития. *Аграрная экономика*. 2018;1(272):47–55.
7. Barlog P, Grzebisz W. Effect of timing and nitrogen fertilizer application on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). I. Growth dynamics and seed yield. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2004;190:305–313. DOI: 10.1111/j.1439-037X.2004.00108.x.
8. Henke J, Breustedt G, Sieling K. Impact of uncertainty on the optimum nitrogen fertilization rate and agronomic, ecological and economic factors in an oilseed rape based crop rotation. *Journal of Agricultural Science*. 2007;145:455–468. DOI: 10.1017/S0021859607007204.
9. Sieling K, Kage H. Efficient N management using winter oilseed rape. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2010;30:271–279.
10. Лапа ВВ, Цыбулько НН, Рак МВ. *Справочник агрохимика*. Минск: ИВЦ Минфина; 2021. 260 с.
11. *Сельское хозяйство Республики Беларусь. Национальный статистический комитет Республики Беларусь*. Минск: РУП «Информационно-вычислительный центр Национального статистического комитета Республики Беларусь»; 2023. 36 с.
12. *Результаты испытания сортов сельскохозяйственных растений на хозяйственную полезность в Республике Беларусь за 2019–2021 годы. В 3 ч. Ч. 2. Картофель, овощные, плодовые и ягодные, рапс озимый и яровой, соя, подсолнечник, лен-долгунец и лен масличный*. Минск: Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Государственная инспекция по испытанию и охране сортов растений; 2022. 183 с.
13. *Результаты испытания сортов сельскохозяйственных растений на хозяйственную полезность в Республике Беларусь за 2021–2023 годы. В 3 ч. Ч. 2. Картофель, овощные, плодовые и ягодные, рапс озимый и яровой, соя, подсолнечник, лен-долгунец и лен масличный*. Минск: Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Государственная инспекция по испытанию и охране сортов растений; 2024. 141 с.
14. Лапа ВВ, Емельянова ВН, Леонов ФН. *Система применения удобрений*. Гродно: ГГАУ; 2011. 418 с.
15. Malagoli P, Laine P, Rossato L. Dynamics of nitrogen uptake and mobilization in field-grown winter oilseed rape (*Brassica napus*) from stem extension to harvest: I. Global N flows between vegetative and reproductive tissues in relation to leaf fall and their residual N. *Annals of Botany*. 2005;95(5):853–861. DOI: 10.1093/aob/mci091.
16. Bouchet AS, Laperche A, Bissuel-Belaygue C. Nitrogen use efficiency in rapeseed. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2016;36:1–20. DOI: 10.1007/s13593-016-0371-0.
17. Stahl A, Vollrath P, Samans B. Effect of breeding on nitrogen use efficiency-associated traits in oilseed rape. *Journal of Experimental Botany*. 2019;70(6):1969–1986. DOI: 10.1093/jxb/erz044.
18. Rutkowska A. Productivity of winter oilseed rape depending on its nitrogen and water use efficiency. *Polish Journal of Agronomy*. 2019;39:10–15. DOI: 10.26114/pja.iung.403.2019.39.02.
19. Berry PM, Spink J, Foulkes MJ. The physiological basis of genotypic differences in nitrogen use efficiency in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Field Crops Research*. 2010;119:365–373. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.08.004.
20. Stahl A, Pfeifer M, Frisch M. Recent genetic gains in nitrogen use efficiency in oilseed rape. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:963. DOI: 10.3389/fpls.2017.00963.
21. Miersch S. Nitrogen efficiency in semi-dwarf and normal hybrids of oilseed rape [dissertation] [Internet, cited 2025 February 1] Göttingen; 2014. 112 p. Available from: <https://d-nb.info/1072820323/34>.

22. Hnilička R, Škeřík J. Vysledky pokusu SPZO v sezone 2019/20. *Vyhodnocovací sborník*. 2020;37:136 p.
23. Ключкова ОС, Соломко ОБ. Сравнительная оценка сорта и гибрида ярового рапса при различных фонах азотного питания и нормах высева. *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2014;1:54–59.
24. Горлов СЛ, Горлова ЛА, Бочкарева ЭБ. Результаты испытания сортов и гибридов рапса озимого в условиях центральной зоны Краснодарского края. *Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК*. 2015;1(161):52–56.
25. Романцевич ДИ, Пальчик АА. Сравнительная оценка сортов и гибридов озимого рапса в условиях СХФ «Красный Май» ОАО «Минский завод игристых вин» Пуховичского района». В: Мастеров АС, редактор. *Технологические аспекты возделывания сельскохозяйственных культур. Сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции*. Горки: БГСХА; 2024. с. 205–207.
26. Сердюк ОА, Горлова ЛА. Оценка гибридов рапса озимого селекции ВНИИМК на основе ЦМС на устойчивость к фомозу. В: Гостев АВ, редактор. *Проблемы и перспективы научно-инновационного обеспечения агропромышленного комплекса регионов. Сборник материалов V Международной научно-практической конференции*. Курск: Курский федеральный аграрный научный центр; 2023. с. 63–67.
27. Berry PM, Kindred DR, Paveley ND. Quantifying the effects of fungicides and disease resistance on greenhouse gas emissions associated with wheat production. *Plant Pathology*. 2008;57:1000–1008. DOI: 10.1111/j.1365-3059.2008.01899.x.
28. Fortune JA, Qi A, Ritchie F. Effect of cultivar resistance and fungicide application on stem canker of oilseed rape (*Brassica napus*) and potential interseasonal transmission of *Leptosphaeria* spp. inoculum. *Plant Pathology*. 2021;70:2115–2124. DOI: 10.1111/ppa.13453.
29. Jones RAC, Sharman M, Trebicki P. Virus diseases of cereal and oilseed crops in Australia: Current position and future challenges. *Viruses*. 2021;13:2051. DOI: 10.3390/v13102051.
30. Jones RAC, Coutts BA, Hawkes J. Yield-limiting potential of beet western yellows virus in *Brassica napus*. *Australian Journal of Agricultural Research*. 2007;58:788–801. DOI: 10.1071/AR06391.
31. Congdon BS, Baulch JR, Coutts BA. Impact of turnip yellows virus infection on seed yield of an open-pollinated and hybrid canola cultivar when inoculated at different growth stages. *Virus Research*. 2020;277:197847. DOI: 10.1016/j.virusres.2019.197847.
32. Schroeder M. Investigations on the susceptibility of oilseed rape (*Brassica napus* L., ssp. *napus*) to different virus diseases. *Journal of Plant Diseases and Protection*. 1994;101:567–589.
33. Graichen K, Schliephake E. Infestation of winter oilseed rape by turnip yellows luteovirus and its effect on yield in Germany. In: Wratten N, Salisbury PA, editors. *Proceedings of the 10th International Rapeseed Congress—New Horizons for An Old Crop*. Canberra, Australia: International Consultative Group for Rapeseed Research; 1999. p. 131–136.
34. Walsh JA, Perrin RM, Miller A. Studies on beet western yellows virus in winter oilseed rape (*Brassica napus* ssp. *oleifera*) and the effect of insecticidal treatment on its spread. *Crop Protection*. 1989;8:137–143. DOI: 10.1016/0261-2194(89)90090-2.
35. Лапа ВВ, Цыtron ГС, Шибут ЛИ. *Пригодность почв Республики Беларусь для возделывания отдельных сельскохозяйственных культур*. Минск: РУП «Институт почвоведения и агрохимии»; 2011. 63 с.
36. Азаренок ТН, Шашко ЮК, Матыченкова ОВ. *Методика формирования посевных площадей для возделывания сельскохозяйственных культур в изменяющихся агроклиматических условиях для обеспечения экологически безопасного и ресурсосберегающего землепользования*. Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси; 2024. 64 с.

References

1. Piljuk JaJe. *Raps v Belarusi: biologija, selekcija i tehnologija vzdelyvanija* [Rapeseed in Belarus: biology, selection and cultivation technology]. Minsk: Biznesofset, 2007. 240 p. Russian
2. Pestis MV. Status and ways to improve the efficiency of rapeseed production in agricultural organizations of the Republic of Belarus. *Sel'skoe hozjajstvo – problemy i perspektivy* [Agriculture – problems and prospects]. 2018;43:215–221. Russian
3. Degtjarevich II, Bondarovich LA. *Organizacionno-jekonomicheskie osnovy funkcionirovanija rapsoproduktovogo podkompleksa APK* [Organizational and economic foundations of the functioning of the rapeseed product subcomplex of the agro-industrial complex]. Grodno: GGAU, 2015. 153 p. Russian
4. Oganezov IA, Lovkis LK. Current state, trends and prospects for the development of the rapeseed oil market and the main products of its processing. *Pishhevaja promyshlennost': nauka i tehnologii* [Food industry: science and technology]. 2024;2(64):13–22. Russian
5. Starostina L, Trofimov A. Oilseed gold. Features of rapeseed cultivation and processing. *Agrotehnika i tehnologii* [Agricultural machinery and technologies]. 2022;1:17–28. Russian
6. Radchenko N, Sokolovskaja E. Rapeseed processing in the Republic of Belarus: analysis of trends and strategic development guidelines. *Agrarnaja jekonomika* [Agricultural economy]. 2018;1(272):47–55. Russian
7. Barlog P, Grzebisz W. Effect of timing and nitrogen fertilizer application on winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). I. Growth dynamics and seed yield. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2004;190:305–313. DOI: 10.1111/j.1439-037X.2004.00108.x.
8. Henke J, Breustedt G, Sieling K. Impact of uncertainty on the optimum nitrogen fertilization rate and agronomic, ecological and economic factors in an oilseed rape based crop rotation. *Journal of Agricultural Science*. 2007;145:455–468. DOI: 10.1017/S0021859607007204.
9. Sieling K, Kage H. Efficient N management using winter oilseed rape. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2010;30:271–279.
10. Лапа ВВ, Цыбулько NN, Rak MV. *Spravochnik agrohimika* [Agrochemist's Handbook]. Minsk: IVC Minfina. 2021. 260 p. Russian
11. *Sel'skoe hozjajstvo Respubliki Belarus'* [Agriculture of the Republic of Belarus]. *Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus'*. Minsk: RUP «Informacionno-vychislitel'nyj centr Nacional'nogo statisticheskogo komiteta Respubliki Belarus'», 2023. 36 p. Russian
12. *Rezul'taty ispytaniya sortov sel'skohozjajstvennyh rastenij na hozjajstvennuju poleznost' v Respublike Belarus' za 2019–2021 gody. V 3 chastiah. Chast 2. Kartofel', ovoshhnye, plodovye i jagodnye, raps ozimyj i jarovoj, soja, podsolnechnik, len-dolgunec i len maslichnyj* [Results of testing agricultural plant varieties for economic usefulness in the Republic of Belarus for 2019–2021. In 3 parts. Part 2. Potatoes, vegetables, fruits and berries, winter and spring rape, soybeans, sunflower, flax and oil flax]. Minsk: Ministerstvo sel'skogo hozjajstva i prodovol'stvija Respubliki Belarus', Gosudarstvennaja inspekcija po ispytaniju i ohrane sortov rastenij; 2022. 183 p. Russian.

13. Rezul'taty ispytaniya sortov sel'skhozjajstvennyh rastenij na hozjajstvennuju poleznost' v Respublike Belarus' za 2021–2023 gody. V 3 chastyah. Chast 2. Kartofel', ovoshhnye, plodovye i jagodnye, raps ozimyj i jarovoj, soja, podsolnechnik, len-dolgunec i len maslichnyj [Results of testing agricultural plant varieties for economic usefulness in the Republic of Belarus for 2021–2023. In 3 parts. Part 2. Potatoes, vegetables, fruits and berries, winter and spring rape, soybeans, sunflower, fiber flax and oil flax]. Minsk: Ministerstvo sel'skogo khozjajstva i prodovol'stviya Respubliki Belarus', Gosudarstvennaja inspekcija po ispytaniyu i ohrane sortov rastenij; 2024. 141 p. Russian
14. Lapa VV, Emel'janova VN, Leonov FN. *Sistema primenenija udobrenij* [Fertilizer application system]. Grodno: GGAU; 2011. 418 p. Russian
15. Malagoli P, Laine P, Rossato L. Dynamics of nitrogen uptake and mobilization in field-grown winter oilseed rape (*Brassica napus*) from stem extension to harvest: I. Global N flows between vegetative and reproductive tissues in relation to leaf fall and their residual N. *Annals of Botany*. 2005;95(5):853–861. DOI: 10.1093/aob/mci091.
16. Bouchet AS, Laperche A, Bissuel-Belaygue C. Nitrogen use efficiency in rapeseed. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2016;36:1–20. DOI: 10.1007/s13593-016-0371-0.
17. Stahl A, Vollrath P, Samans B. Effect of breeding on nitrogen use efficiency-associated traits in oilseed rape. *Journal of Experimental Botany*. 2019;70(6):1969–1986. DOI: 10.1093/jxb/erz044.
18. Rutkowska A. Productivity of winter oilseed rape depending on its nitrogen and water use efficiency. *Polish Journal of Agronomy*. 2019;39:10–15. DOI: 10.26114/pja.iung.403.2019.39.02.
19. Berry PM, Spink J, Foulkes MJ. The physiological basis of genotypic differences in nitrogen use efficiency in oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Field Crops Research*. 2010;119:365–373. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.08.004.
20. Stahl A, Pfeifer M, Frisch M. Recent genetic gains in nitrogen use efficiency in oilseed rape. *Frontiers in Plant Science*. 2017;8:963. DOI: 10.3389/fpls.2017.00963.
21. Miersch S. Nitrogen efficiency in semi-dwarf and normal hybrids of oilseed rape [dissertation] [Internet, cited 2025 February 1] Göttingen; 2014. 112 p. Available from: <https://d-nb.info/1072820323/34>.
22. Hnilička R, Škeřik J. Vysledky pokusu SPZO v sezone 2019/20. *Vyhodnocovací sborník* [Evaluation report]. 2020;37:136 p. Czech.
23. Klochkova OS, Solomko OB. Comparative evaluation of spring rapeseed varieties and hybrids under different nitrogen nutrition backgrounds and seeding rates. *Vestnik Belorusskoj gosudarstvennoj sel'skhozjajstvennoj akademii* [Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy]. 2014;1:54–59. Russian
24. Gorlov SL, Gorlova LA, Bochkareva JeB. Results of testing winter rapeseed varieties and hybrids under the conditions of the central zone of Krasnodar Krai. *Maslichnye kul'tury. Nauchno-tehnicheskij bjulleten' VNIIMK* [Oilseeds. Scientific and technical bulletin of VNIIMK]. 2015;1(161):52–56. Russian
25. Romancevich DI, Pal'chik AA. Comparative evaluation of winter rapeseed varieties and hybrids under the conditions of the Krasnyy May Agricultural Factory of the Minsk Sparkling Wines Plant of Pukhovich District. In: Masterov AS, editor. *Tehnologicheskie aspekty vozdeľyvanija sel'skhozjajstvennyh kul'tur. Sbornik statej XXIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Technological aspects of cultivation of agricultural crops. Collection of articles of the XXIII International scientific and practical conference]. Gorki. 2024. p. 205–207. Russian
26. Serdjuk OA, Gorlova LA. Evaluation of winter rape hybrids of VNIIMK selection based on CMS for resistance to phomosis. In: Gostev AS, editor. *Problemy i perspektivy nauchno-innovacionnogo obespečenija agropromyshlennogo kompleksa regionov* [Problems and Prospects of Scientific and Innovative Support of the Agro-Industrial Complex of the Regions. Collection of Materials of the V International Scientific and Practical Conference]. Kursk: Kurskiy federalnyj agrarnyj nauchnyj tsentr; 2023. p. 63–67. Russian
27. Berry PM, Kindred DR, Paveley ND. Quantifying the effects of fungicides and disease resistance on greenhouse gas emissions associated with wheat production. *Plant Pathology*. 2008;57:1000–1008. DOI: 10.1111/j.1365-3059.2008.01899.x.
28. Fortune JA, Qi A, Ritchie F. Effect of cultivar resistance and fungicide application on stem canker of oilseed rape (*Brassica napus*) and potential interseasonal transmission of *Leptosphaeria* spp. inoculum. *Plant Pathology*. 2021;70:2115–2124. DOI: 10.1111/ppa.13453.
29. Jones RAC, Sharman M, Trebicki P. Virus diseases of cereal and oilseed crops in Australia: Current position and future challenges. *Viruses*. 2021;13:2051. DOI: 10.3390/v13102051.
30. Jones RAC, Coutts BA, Hawkes J. Yield-limiting potential of beet western yellows virus in *Brassica napus*. *Australian Journal of Agricultural Research*. 2007;58:788–801. DOI: 10.1071/AR06391.
31. Congdon BS, Baulch JR, Coutts BA. Impact of turnip yellows virus infection on seed yield of an open-pollinated and hybrid canola cultivar when inoculated at different growth stages. *Virus Research*. 2020;277:197847. DOI: 10.1016/j.virusres.2019.197847.
32. Schroeder M. Investigations on the susceptibility of oilseed rape (*Brassica napus* L., ssp. *napus*) to different virus diseases. *Journal of Plant Diseases and Protection*. 1994;101:567–589.
33. Graichen K, Schliephake E. Infestation of winter oilseed rape by turnip yellows luteovirus and its effect on yield in Germany. In: Wratten N, Salisbury PA, editors. *Proceedings of the 10th International Rapeseed Congress—New Horizons for An Old Crop*. Canberra, Australia: International Consultative Group for Rapeseed Research; 1999. p. 131–136.
34. Walsh JA, Perrin RM, Miller A. Studies on beet western yellows virus in winter oilseed rape (*Brassica napus* ssp. *oleifera*) and the effect of insecticidal treatment on its spread. *Crop Protection*. 1989;8:137–143. DOI: 10.1016/0261-2194(89)90090-2.
35. Lapa VV, Cytron GS, Shibus LI. *Prigodnost' pochv Respubliki Belarus' dlja vozdeľyvanija otdel'nyh sel'skhozjajstvennyh kul'tur* [Suitability of soils of the Republic of Belarus for cultivation of individual agricultural crops]. Minsk: RUP «Institut pochvovedenija i agrohimii», 2011. 63 p. Russian.
36. Azarenok TN, Shashko JuK, Matychenkova OV. *Metodika formirovanija posevnyh ploshhadej dlja vozdeľyvanija sel'skhozjajstvennyh kul'tur v izmenjajushhihsja agroklimaticheskikh uslovijah dlja obespečenija jekologičeskogo bezopasnogo i resursoberegajushhego zemlepol'zovanija* [Methodology for the formation of sown areas for cultivation of agricultural crops in changing agroclimatic conditions to ensure environmentally safe and resource-saving land use]. Minsk: Institut sistemnyh issledovanij v APK NAN Belarusi, 2024. 64 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 17.02.2025.
Received by editorial board 17.02.2025.

ПРОТИВОЭРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ НА РАЗНЫХ АГРОФОНАХ

Н. Н. ЦЫБУЛЬКО¹⁾, В. Б. ЦЫРИБКО²⁾, А. В. ЮХНОВЕЦ²⁾, И. И. ЖУКОВА³⁾, И. А. ЛОГАЧЕВ²⁾

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

²⁾Институт почвоведения и агрохимии, Национальная академия наук Беларуси,
ул. Казинца, 90, 220108, г. Минск, Беларусь

³⁾Белорусский государственный педагогический университет им. Максима Танка,
ул. Советская, 18, 220030, г. Минск, Беларусь

Дерново-подзолистые почвы непосредственно после механической обработки характеризуются очень низкой противозэрозийной стойкостью. Величина размывающей скорости водного потока ($V_{\Delta p}$) не превышает 11,1 см/с. Устойчивость почв к размыву снижается с повышением степени их эрозийной деградации. Использование эродированных почв в почвозащитных травяно-зерновых севооборотах способствует улучшению устойчивости к эрозии. Средне- и сильноэродированные почвы на лессовидных суглинках в зерновом севообороте отличались низкими $V_{\Delta p}$ – 16,5–18,5 см/с, а в травяно-зерновом севообороте с возделыванием люцерны – высоким и средним $V_{\Delta p}$ – 33,1 и 29,8 см/с соответственно. При органоминеральной системе удобрения наблюдалось повышение противозэрозийной стойкости почв по сравнению с минеральной системой удобрения. Размывающая скорость водного потока составила в среднем на незэродированной почве 25,7 см/с, среднеэродированной – 21,8 и сильноэродированной почве – 18,5 см/с. Внесение известковых мелиорантов на фоне органоминеральной системы удобрения не привело к повышению $V_{\Delta p}$. Установлена тесная корреляционная связь ($r = 0,76$) размывающей скорости водного потока с показателем средневзвешенного диаметра водопрочных агрегатов в верхнем слое почвы.

Ключевые слова: эродированные почвы; севообороты; система удобрения; противозэрозийная стойкость; размывающей скорости водного потока.

Благодарность. Исследования выполнены по заданию 2.42. «Установление закономерностей влияния основных показателей плодородия и элементов агротехнологий на устойчивость почв к эрозийной деградации» ГПНИ «Качество и эффективность агропромышленного производства» на 2016–2020 годы, подпрограмма «Сохранение и повышение плодородия почв».

Образец цитирования:

Цыбулько НН, Цырибко ВБ, Юхновец АВ, Жукова ИИ, Логачев ИА. Противозэрозийная стойкость дерново-подзолистых почв на разных агрофонах. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2025;1:77–84.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-77-84>

For citation:

Tsybulka MM, Tsyribko VB, Yukhnovets AV, Zhukova II, Logachov IA. Erosion stability of sod-podzolic soils in different agricultural fields. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2025;1:77–84. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-77-84>

Авторы:

Николай Николаевич Цыбулько – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; начальник научно-исследовательского сектора.

Виктор Борисович Цырибко – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; заведующий лабораторией агрофизических свойств и защиты почв от эрозии.

Аксана Викентьевна Юхновец – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; ученый секретарь.

Инна Ивановна Жукова – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; заведующий кафедрой биологии и методики преподавания биологии.

Илья Александрович Логачев – младший научный сотрудник лаборатории агрофизических свойств и защиты почв от эрозии.

Authors:

Mikalai M. Tsybulka, doctor of science (agriculture), full professor; head of the research sector.

nik.nik1966@tut.by

Viktor B. Tsyribko, PhD (agriculture), docent; head of the laboratory of agrophysical properties and protection of soil erosion.

m029@yandex.by

Aksana V. Yukhnovets, PhD (agriculture), docent; scientific secretary.

brissa_secretary@mail.ru

Inna I. Zhukova, PhD (agriculture), docent; head of the department of biology and methods of teaching biology.

inn0707@bspu.by

Ilya A. Logachev, junior researcher at the laboratory of agrophysical properties and protection.

ia_logachev@list.ru

EROSION STABILITY OF SOD-PODZOLIC SOILS IN DIFFERENT AGRICULTURAL FIELDS

M. M. TSYBULKA^a, V. B. TSYRIBKO^b, A. V. YUKHNOVETS^b, I. I. ZHUKOVA^c, I. A. LOGACHOV^b

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

^bInstitute of Soil Science and Agrochemistry, National Academy of Sciences of Belarus,
90 Kazinets Street, Minsk 220108, Belarus

^cBelarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank,
18 Saveckaja Street, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: M. M. Tsybulka (nik.nik1966@tut.by)

Soddy-podzolic soils immediately after mechanical treatment are characterized by very low erosion resistance. The erosive velocity of the water flow does ($V_{\Delta p}$) not exceed 11.1 cm/s. Soil resistance to erosion decreases with increasing degree of erosion degradation. The use of eroded soils in soil-protective grass-grain crop rotations helps improve their resistance to erosion. Moderately and highly eroded soils on loess-like loams in grain crop rotation were characterized by low $V_{\Delta p}$ – 16.5–18.5 cm/s, and in grass-grain crop rotation with alfalfa cultivation – high and medium $V_{\Delta p}$ – 33.1 and 29 cm/s. With the organomineral fertilizer system, an increase in the anti-erosion resistance of soils was observed compared to the mineral fertilizer system. The eroding velocity of water flow averaged 25.7 cm/s on non-eroded soil, 21.8 cm/s on moderately eroded soil, and 18.5 cm·s⁻¹ on highly eroded soil. The application of lime ameliorants against the background of an organomineral fertilizer system did not lead to an increase in $V_{\Delta p}$. A close correlation has been established ($r = 0.76$) between the erosive velocity of water flow and the weighted average diameter of water-resistant aggregates in the soil.

Keywords: eroded soils; crop rotation; fertilization system; erosion resistance; erosion speed of water flow.

Acknowledgments. The research was carried out according to task 2.42. «Establishing patterns of influence of the main indicators of fertility and elements of agrotechnologies on soil resistance to erosion degradation» GPNI «Quality and efficiency of agro-industrial production» for 2016–2020, the subprogram «Conservation and improvement of soil fertility».

Введение

На территории Беларуси водной эрозии подвержено 473,3 тыс. га сельскохозяйственных земель. Эродируемость (смываемость) почвы один из основных факторов водной эрозии. Противозэрозийная стойкость почвы является интегральным показателем и определяется комплексом таких свойств, как минералогический состав, физические и агрохимические показатели. Основными физическими свойствами почв, определяющими устойчивость их к эрозии, являются гранулометрический, микроагрегатный и структурно-агрегатный состав, плотность, пористость и сцепление.

В мировой практике эрозионных исследований известно множество подходов и методов определения эродируемости почвы как прямых, так и косвенных. Для количественной оценки этого параметра, используемого как в статистических, так и в физически обоснованных моделях смыва почв, предложено более десятка различных подходов и способов [1]. В качестве одной из определяющих величин, помимо свойств самой почвы, предлагаются кинетические характеристики склоновых потоков – неразмывающая скорость [2; 3], критическое касательное напряжение [4]. Для оценки эродируемости применяется показатель в виде частного от деления интенсивности смыва на куб скорости потока, который для водных потоков численно равен половине удельной мощности потока [5–7]. В США и странах Западной Европы для оценки податливости почвы эрозии используется предложенное В. Х. Уишмейером и Д. Д. Смитом определение ее эродируемости – количество смытой почвы с эталонной площадки по бессменному пару на единицу эрозионного потенциала осадков [8].

М. С. Кузнецовым установлена зависимость между средневзвешенным диаметром водопрочных агрегатов, сцеплением и плотностью почвы, содержанием корней растений диаметром <1 мм и так называемой донной размывающей скоростью водного потока. Автором предложено уравнение для определения донной размывающей скорости водного потока для почв по вышеперечисленным показателям [9]. Показано, что противозэрозийная стойкость почв количественно выражается величиной размывающей скорости потока, которая непосредственно определяется двумя показателями почвы: размером водопрочных агрегатов и сцеплением их друг с другом. Остальные свойства почв влияют на противозэрозийную стойкость косвенно, через эти показатели. Следовательно, противозэрозийная стойкость почвы в целом определяется водопрочностью ее структуры [10].

Цель исследования – определение размывающей скорости водного потока для дерново-подзолистых почв в разной степени подверженных эрозионной деградации, а также в зависимости от их использования в разных севооборотах, приемов обработки почвы и системы удобрения.

Материалы и методы исследования

Объектами исследования являлись почвенно-геоморфологические профили, представленные в разной степени эродированными (смытыми) дерново-подзолистыми почвами, сформированными на лессовидных и моренных суглинках. Дерново-подзолистые эродированные почвы на лессовидных суглинках располагались на склоне южной экспозиции крутизной 6–7°, а дерново-подзолистые эродированные почвы на моренных суглинках – на склоне северо-восточной экспозиции крутизной 5–7°. На дерново-подзолистых эродированных почвах на лессовидных суглинках исследования проводили в зерновом и травяно-зерновом севооборотах. На дерново-подзолистых эродированных почвах на моренных суглинках исследования проводили в зернотравяном и травяно-зерновом севооборотах.

На дерново-подзолистых незэродированных, слабо- и сильноэродированных почвах в звене зернотравяного севооборота (яровая пшеница – озимая рожь – бобово-злаковые травы) изучено влияние на размывающую скорость водного потока способов основной обработки почв – отвальной вспашки на 20–22 см, безотвальной чизельной обработки на 20–22 см и мелкой дисковой обработки на 10–12 см.

На дерново-подзолистых незэродированных, средне- и сильноэродированных почвах на лессовидных суглинках изучено влияние разных систем удобрения сельскохозяйственных культур на показатель размывающей скорости водного потока. Схема опыта и дозы применения известкового мелиоранта, органических и минеральных удобрений в зерновом севообороте приведены в табл. 1.

Таблица 1

Схема опыта и дозы применения известкового мелиоранта, органических и минеральных удобрений при разных системах удобрения в севообороте

Table 1

Scheme of experience and rates of lime meliorant, organic and mineral fertilizers in different fertilizer systems in crop rotation

Система удобрения	Культуры севооборота			
	*овес	яровой рапс	яровая пшеница	озимая рожь
Неэродированная почва				
Минеральная	N ₉₀ P ₆₀ K ₈₀	N ₁₃₀ P ₆₀ K ₉₀	N ₁₂₀ P ₆₀ K ₉₀	N ₁₃₀ P ₆₀ K ₉₀
Минеральная + известкование почвы	N ₉₀ P ₆₀ K ₈₀ + ДМ _{6,5}	N ₁₃₀ P ₆₀ K ₉₀	N ₁₂₀ P ₆₀ K ₉₀	N ₁₃₀ P ₆₀ K ₉₀
Органоминеральная	N ₉₀ P ₆₀ K ₈₀ + ОУ ₄₀	N ₁₃₀ P ₆₀ K ₉₀	N ₁₂₀ P ₆₀ K ₉₀ + ОУ ₄₀	N ₁₃₀ P ₆₀ K ₉₀
Органоминеральная + известкование почвы	N ₉₀ P ₆₀ K ₈₀ + ОУ ₄₀ + ДМ _{6,5}	N ₁₃₀ P ₆₀ K ₉₀	N ₁₂₀ P ₆₀ K ₉₀ + ОУ ₄₀	N ₁₃₀ P ₆₀ K ₉₀

Примечание. ДМ – доломитовая мука в т/га; ОУ – органические удобрения (подстилочный навоз) в т/га.

Структурно-агрегатный анализ почв для определения средневзвешенного диаметра водопрочных агрегатов при водном просеивании выполняли по методу Саввинова [11]. Размывающую скорость водного потока для почв рассчитывали по модифицированному уравнению М. С. Кузнецова [12]. Противоэрозионную стойкость почв оценивали по шкале (табл. 2). Статистическая обработка (определение доверительного интервала) проведена в программном пакете MS Excel.

Таблица 2

Классификация почв по противоэрозионной стойкости

Table 2

Classification of soils by erosion resistance

Противоэрозионная стойкость почвы	Размывающая скорость водного потока, см/с*	Почвы, горизонты
Очень низкая	<15	Рыхлые пахотные горизонты без растительности
Низкая	15–20	Пахотные горизонты под зерновыми культурами (плотность почвы <1,2 г/см ³)
Средняя	20–30	Пахотные горизонты под зерновыми культурами (плотность почвы >1,2 г/см ³)
Высокая	30–50	Пахотные горизонты под травами и зернобобовыми смесями и подпахотные горизонты почв
Очень высокая	> 50	Пахотные горизонты под хорошо развитыми многолетними травами и луговой растительностью

Примечание. Для потока глубиной 1 см, см/с.

Результаты исследования и их обсуждение

В научной литературе встречаются противоречивые результаты исследования влияния механических обработок почв на устойчивость их к смыву. Отмечается, что безотвальные приемы обработки способствуют повышению содержания в почве эрозионно-устойчивых агрегатов по сравнению с традиционной отвальной вспашкой [13]. Имеются научные публикации, в которых отмечается, что показатели устойчивости к эрозии зависят от обработки до определенного предела, когда механические обработки не оказывают на них прямого воздействия [14; 15].

В наших исследованиях определение донной размывающей скорости водного потока ($V_{\Delta p}$) показало, что рыхлый пахотный горизонт почвы непосредственно после проведения механической обработки характеризуются очень низкой устойчивостью к смыву и размыву (менее 15 см/с). Величина $V_{\Delta p}$ колебалась по вариантам с отвальной и безотвальными чизельной и дисковой обработками в пределах 9,4–11,1 см/с. Незначительно выше этот показатель был на безотвальных обработках, что обусловлено защитным влиянием послеуборочных растительных остатков на скорость водного потока (табл. 3).

Таблица 3

**Влияние обработок почвы в звене севооборота
 яровая пшеница – озимая рожь – бобово-злаковые травы
 на размывающую скорость водного потока, см/с**

Table 3

**The effect of soil treatments in the crop rotation link
 spring wheat – winter rye – legume-cereal grasses on the erosion rate of water flow, cm/s**

Основная обработка почвы	Эродированность почвы		
	неэродированная	слабоэродированная	сильноэродированная
Отвальная вспашка на 20–22 см	10,4 ± 0,2	10,1 ± 0,2	9,4 ± 0,1
Безотвальная чизельная на 20–22 см	11,1 ± 0,3	10,4 ± 0,2	9,9 ± 0,2
Поверхностная дисковая на 10–12 см	11,1 ± 0,3	10,3 ± 0,2	9,7 ± 0,1

Результаты исследований показали, что устойчивость почв к смыву и размыву существенно зависит от степени их эрозионной деградации и использования. Так, дерново-подзолистые почвы на лессовидных суглинках, не подверженные эрозии, в зерновом севообороте отличались средней противоэрозионной стойкостью по шкале М. С. Кузнецова. Донная размывающая скорость водного потока для них колебалась в пределах 20,3–26,5 см/с (в среднем 23,4 см/с). Средне- и сильноэродированные почвы имели низкую устойчивость с $V_{\Delta p}$ 18,5 и 16,5 см/с соответственно.

Неэродированная и среднеэродированная почвы при трехлетнем возделывании люцерны посевной в травяно-зерновом севообороте характеризовались высокой устойчивостью, сильноэродированная почва – средней устойчивостью к смыву. Размывающие скорости составили 40,1, 33,1 и 29,8 см/с соответственно (табл. 4).

Дерново-подзолистые почвы на моренных суглинках имели более высокие значения размывающей скорости водного потока, то есть отличались лучшей противоэрозионной стойкостью по сравнению с почвами на лессовидных суглинках. В зернотравяном севообороте при возделывании зерновых культур и однолетних бобово-злаковых трав $V_{\Delta p}$ неэродированной почвы изменялась по годам от 26,2 до 29,0 см/с, слабо- и среднеэродированной почв – от 23,3 до 26,5, сильноэродированной почвы – от 20,5 до 23,7 см/с, что в среднем составила 27,0 см/с, 24,2 см/с и 22,1 см/с соответственно. Следовательно, почвы по величине размывающей скорости водного потока относились (по шкале М. С. Кузнецова) к средней противоэрозионной стойкости.

В травяно-зерновом севообороте при трехлетнем возделывании люцерны посевной наблюдалось существенное повышение устойчивости почв к смыву. На всех по эродированности почвах значения размывающей скорости водного потока были высокими – > 30 см/с, а под люцерной второго и третьего годов пользования достигала 60 см/с и выше, что соответствует очень высокой противоэрозионной стойкости почвы.

Размывающая скорость водного потока (см/с) для дерново-подзолистых почв в разных севооборотах

Table 4

Erosion rate of water flow (cm/s) for sod-podzolic soils in different crop rotations

Севооборот	Культуры севооборота	Степень эродированности почвы			
		неэродированная	слабоэродированная	среднеэродированная	сильноэродированная
Дерново-подзолистая почва, сформированная на легких лессовидных суглинках					
Зерновой севооборот	Овес	23,0 ± 3,3	–	16,5 ± 1,8	16,4 ± 2,0
	Яровой рапс	20,3 ± 0,5	–	16,4 ± 0,3	16,2 ± 0,2
	Яровая пшеница	23,7 ± 3,7	–	20,5 ± 3,6	16,7 ± 6,8
	Озимая рожь	26,5 ± 2,7	–	20,5 ± 0,1	16,7 ± 6,5
	Среднее за севооборот	23,4	–	18,5	16,5
Травяно-зерновой севооборот	Однолетние травы + люцерна	39,9 ± 5,8	–	28,1 ± 3,4	27,7 ± 4,9
	Люцерна 1-го года пользования	39,9 ± 6,1	–	34,4 ± 0,6	27,7 ± 5,2
	Люцерна 2-го года пользования	40,4 ± 0,1	–	35,0 ± 5,3	28,6 ± 6,3
	Люцерна 3-го года пользования	40,4 ± 5,3	–	35,0 ± 0,2	35,0 ± 6,3
	Среднее за севооборот	40,1	–	33,1	29,8
Дерново-подзолистая почва, сформированная на моренных суглинках					
Зернотравяной севооборот	Однолетние травы	26,2 ± 3,2	23,4 ± 3,8	23,3 ± 2,5	23,7 ± 3,3
	Озимая тритикале	26,2 ± 5,6	23,4 ± 5,5	23,3 ± 8,9	20,5 ± 3,1
	Однолетние травы	26,5 ± 2,5	26,5 ± 2,7	26,5 ± 2,7	23,7 ± 3,1
	Озимая пшеница	29,0 ± 8,3	23,7 ± 3,1	23,7 ± 3,2	20,5 ± 3,7
	Среднее за севооборот	27,0	24,2	24,2	22,1
Травяно-зерновой севооборот	Яровая пшеница + люцерна	30,7 ± 5,4	29,0 ± 3,9	26,1 ± 5,1	23,5 ± 3,3
	Люцерна 1-го года пользования	44,4 ± 9,1	44,9 ± 8,4	45,2 ± 0,8	39,9 ± 9,9
	Люцерна 2-го года пользования	63,9 ± 16,4	57,2 ± 13,1	60,6 ± 4,7	45,2 ± 9,8
	Люцерна 3-го года пользования	60,6 ± 10,9	57,2 ± 15,4	45,2 ± 11,5	45,2 ± 13,6
	Среднее за севооборот	49,9	47,1	44,3	38,4

Изучено влияние известкового мелиоранта (доломитовая мука), органических (подстилочный навоз) и минеральных (азотных, фосфорных, калийных) удобрений на показатель размывающей скорости водного потока для дерново-подзолистых почв на лессовидных суглинках в разной степени подверженных водной эрозии. В среднем за севооборот при минеральной системе удобрения размывающая скорость водного потока неэродированной почвы была на уровне 23,4 см/с, среднеэродированной почвы – 18,5 см/с и сильноэродированной почвы – 16,5 см/с. По годам этот показатель колебался. Известкование почв на фоне минеральной системы удобрения незначительно повышало противоэрозионную устойчивость почв (табл. 5).

Размывающая скорость водного потока (см/с) для дерново-подзолистых почв при разных системах удобрения в севооборотах

Table 5

Erosion rate of water flow (cm/s) for sod-podzolic soils with different fertilizer systems in crop rotations

Система удобрения	Культуры севооборота				Среднее за севооборот
	овес	яровой рапс	яровая пшеница	озимая рожь	
Неэродированная почва					
Минеральная	23,0 ± 3,3	20,3 ± 0,5	23,7 ± 3,7	26,5 ± 2,7	23,4
Минеральная + известкование почвы	25,7 ± 3,1	19,9 ± 3,1	23,7 ± 0,1	26,5 ± 0,1	24,0
Органоминеральная	30,4 ± 2,4	19,9 ± 0,6	23,5 ± 0,1	29,0 ± 3,0	25,7
Органоминеральная + известкование почвы	34,4 ± 3,2	23,0 ± 2,4	23,7 ± 1,3	23,7 ± 3,1	26,2
Среднеэродированная почва					
Минеральная	16,5 ± 1,8	16,4 ± 0,3	20,5 ± 3,6	20,5 ± 0,1	18,5
Минеральная + известкование почвы	16,5 ± 2,7	16,5 ± 0,3	20,5 ± 3,1	20,5 ± 3,1	18,5
Органоминеральная	20,1 ± 2,0	20,10 ± 0,4	20,5 ± 3,7	26,5 ± 8,3	21,8
Органоминеральная + известкование почвы	20,3 ± 2,6	20,1 ± 3,3	20,5 ± 1,1	26,5 ± 3,6	21,9
Сильноэродированная почва					
Минеральная	16,4 ± 2,0	16,2 ± 0,2	16,7 ± 6,8	16,7 ± 6,5	16,5
Минеральная + известкование почвы	16,4 ± 1,8	16,4 ± 0,2	20,5 ± 3,7	16,7 ± 0,2	17,5
Органоминеральная	16,5 ± 2,6	16,5 ± 3,9	20,5 ± 3,6	23,7 ± 5,8	19,3
Органоминеральная + известкование почвы	16,4 ± 1,4	16,5 ± 0,2	20,5 ± 2,1	20,5 ± 3,7	18,5

Применение органоминеральной системы удобрения способствовало некоторому улучшению устойчивости почв к смыву. Размывающая скорость водного потока составила в среднем за севооборот на неэродированной почве 25,7 см/с, среднеэродированной – 21,8 и сильноэродированной почве – 18,5 см/с. Внесение известковых мелиорантов на фоне органоминеральной системы удобрения не привело к повышению $V_{\Delta p}$.

Ранее нами были представлены результаты изучения влияния разных культур севооборотов и систем удобрения на водоустойчивость макроструктуры (соотношение агрегатов диаметром $\geq 0,25$ мм при водном и сухом просеивании) дерново-подзолистых почв, в разной степени подверженных эрозионной деградации [16]. Выполненный корреляционно-регрессионный анализ сопряженных данных показал, что между значениями водоустойчивости почвенной макроструктуры и размывающей скоростью водного потока для дерново-подзолистых почв существует корреляционная связь средней силы ($r = 0,52$), которая описывается уравнением $y = 0,4728x + 17,17$ (рис. 1).

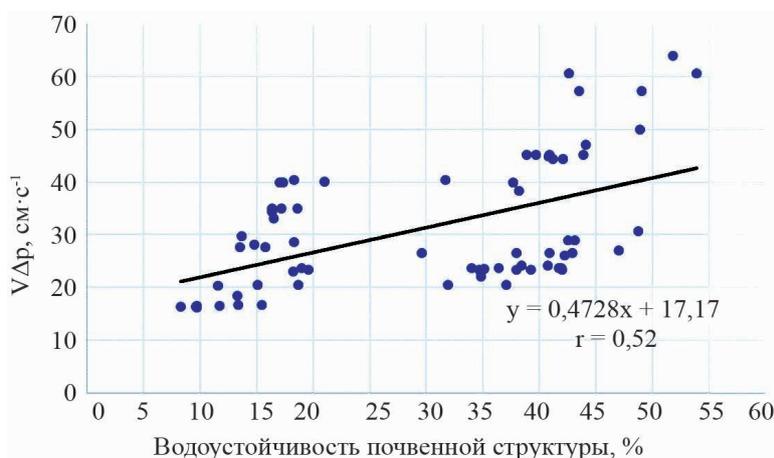


Рис. 1. Зависимость размывающей скоростью водного потока ($V_{\Delta p}$) от водоустойчивости макроструктуры почвы

Fig. 1. Dependence of the eroding velocity of the water flow ($V_{\Delta p}$) on the waterproofness of the soil macrostructure

Тесная корреляционная взаимосвязь ($r = 0,76$) размывающей скорости водного потока для дерново-подзолистых почв установлена с показателем средневзвешенного диаметра водопрочных агрегатов (рис. 2). При средневзвешенном диаметре водопрочных агрегатов 0,2–0,4 мм размывающая скорость водного потока может изменяться от 15 до 30 см/с, что соответствует (по шкале М. С. Кузнецова) низкой и средней противозэрозионной стойкости почвы. При диаметре агрегатов от 0,5 до 0,8 мм величина размывающей скорости водного потока (30–50 см/с) соответствует высокой противозэрозионной стойкости почвы. Очень высокой противозэрозионной стойкостью обладают почвы со средневзвешенным диаметром водопрочных агрегатов $> 0,8$ мм и $V_{\Delta p} > 50$ см/с.

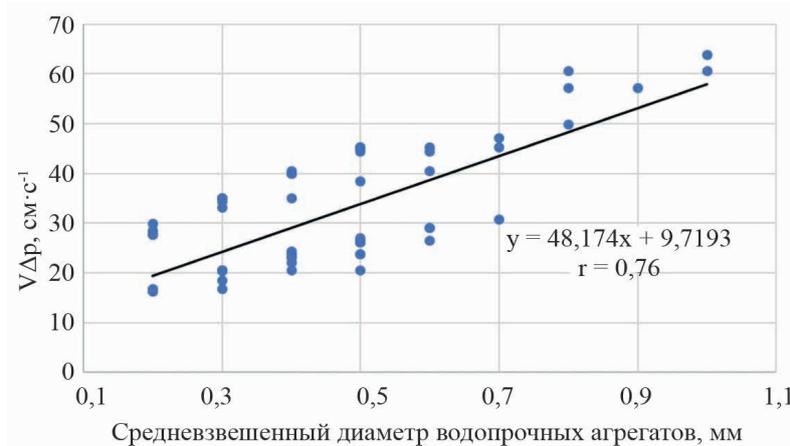


Рис. 2. Зависимость размывающей скоростью водного потока ($V_{\Delta p}$) от средневзвешенного диаметра водопрочных агрегатов в почве

Fig. 1. Dependence of the eroding velocity of the water flow ($V_{\Delta p}$) on the weighted average diameter of the water-bearing aggregates in the soil

Заключение

Таким образом, дерново-подзолистые почвы непосредственно после проведения их механической обработки характеризуются очень низкой устойчивостью к смыву и размыву. Величина размывающей скорости водного потока при отвальной и безотвальных чизельной и дисковой обработках составляет 9,4–11,1 см/с. На безотвальных обработках этот показатель выше, что обусловлено защитным влиянием послеуборочных растительных остатков. Устойчивость почв к размыву снижается с повышением степени их эрозионной деградации.

Использование эродированных почв в почвозащитных травяно-зерновых севооборотах способствует повышению их противозэрозионной стойкости. В зерновом севообороте средне- и сильноэродированные почвы, сформированные на лессовидных суглинках, отличались низкими $V_{\Delta p}$ – 16,5–18,5 см/с, а в травяно-зерновом севообороте, в котором в течение трех лет возделывали люцерну посевную, высоким и средним $V_{\Delta p}$ – 33,1 и 29,8 см/с соответственно.

На фоне применения органоминеральной системы удобрения в севообороте наблюдалось незначительное повышение противозэрозионной стойкости почв по сравнению с минеральной системой удобрения. Размывающая скорость водного потока составила в среднем на незэродированной почве 25,7 см/с, среднеэродированной – 21,8 и сильноэродированной почве – 18,5 см/с. Внесение известковых мелиорантов на органоминеральной системе удобрения не привело к повышению $V_{\Delta p}$.

Установлена тесная корреляция ($r = 0,76$) размывающей скорости водного потока для дерново-подзолистых почв с показателем средневзвешенного диаметра водопрочных агрегатов. При средневзвешенном диаметре водопрочных агрегатов 0,2–0,4 мм размывающая скорость водного потока может изменяться от 15 до 30 см/с, что соответствует низкой и средней противозэрозионной стойкости почвы. При диаметре агрегатов от 0,5 до 0,8 мм величина $V_{\Delta p}$ соответствует высокой противозэрозионной стойкости почвы. Очень высокой противозэрозионной стойкостью обладают почвы со средневзвешенным диаметром водопрочных агрегатов $> 0,8$ мм и $V_{\Delta p} > 50$ см/с.

Библиографические ссылки

1. Лисецкий ФН, Светличный АА, Черный СГ. *Современные проблемы эрозиоведения*. Белгород: Константа, 2012. 456 с.
2. Кузнецов МС. *Противоэрозионная стойкость почв*. Москва: Издательство МГУ; 1981. 135 с.
3. Мирцхулава ЦЕ. *Основы физики и механики эрозии русел*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. 304 с.
4. Foster GR. Modeling the Erosion Process. In: Haan CT, Johnson HP and Brakensiek DL, editors. *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*. Monograph. Michigan: American Society of Agricultural Engineers; 1982. 380 p.
5. Ларионов ГА, Краснов СФ. Вероятностная модель размыва почв и связных грунтов. *Почвоведение*. 2000;2:235–242.
6. Ларионов ГА, Бушуева ОГ, Добровольская НГ, и др. Определение гидрофизических параметров почвы в модели эрозии. *Почвоведение*. 2010;4:488–494.
7. Nearing MA, Bradford JM, Parker SC. Soil Detachment by Shallow Flow at Low Slopes. *Soil Science Society of America Journal*. 1991;55(2):339–344.
8. Wischmeier WH, Smith DD. Predicting rainfall erosion losses. *Agricultural handbook*. 1978;537:65.
9. Кузнецов МС, Базаров ОА. Противоэрозионная стойкость некоторых почв. *Почвоведение*. 1993;4:96–103.
10. Булыгин СЮ, Можейко ГА. Параметры эрозионной стойкости почв лесостепной зоны Украины. *Почвоведение*. 1995;6:768–774.
11. Шейн ЕВ, Карпачевский ЛО, редакторы. *Теория и методы физики почв. Коллективная монография*. Москва: Гриф и К; 2007. 616 с.
12. Кузнецов МС, Глазунов ГП. *Эрозия и охрана почв*. Москва: Издательство МГУ; 2004. 350 с.
13. Дрогозов СЕ. Восстановление структуры эродированных почв. *Почвоведение*. 1993;6: 45–51.
14. Швебс ГИ. Теоретические вопросы почвозащитного земледелия. *Вестник сельскохозяйственной науки*. 1986;8:11–13.
15. Булыгин СЮ, Комарова ТД. К оценке влияния механической обработки на почву. *Почвоведение*. 1990;6:135–138.
16. Цыбулько НН, Цырибко ВБ, Жукова ИИ, Логачев ИА. Водостойчивость структуры дерново-подзолистых почв, подверженных водной эрозии, на разных агрофонах. *Научно-аграрный журнал*. 2024;1(124):40–47.

Reference

1. Lisetsky FN, Svetlichny AA, Cherny SG. *Sovremennye problemy eroziovedeniya* [Modern problems of erosion studies]. Belgorod: Constant; 2012. 456 p. Russian.
2. Kuznetsov MS. *Protivoerozionnaya stojkost' pochv* [Erosion resistance of soils]. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 1981. 135 p. Russian.
3. Mirtskhulava TsE. *Osnovy fiziki i mekhaniki erozii rusel* [Fundamentals of physics and mechanics of riverbed erosion]. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1988. 304 p. Russian.
4. Foster GR. Modeling the Erosion Process. In: Haan CT, Johnson HP and Brakensiek DL, editors. *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*. Monograph. Michigan: American Society of Agricultural Engineers; 1982. 380 p.
5. Larionov GA, Krasnov SF. *Veroyatnostnaya model' razmyva pochv i svyaznyh gruntov* [Probabilistic model of soil erosion and cohesive soils]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Sci.] 2000;2:235–242. Russian.
6. Larionov GA, Bushueva OG, Dobrovolskaya NG, et al. *Opredelenie gidrofizicheskikh parametrov pochvy v modeli erozii* [Determination of hydrophysical parameters of soil in the erosion model]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Sci.] 2010;4:488–494. Russian.
7. Nearing MA, Bradford JM, Parker SC. Soil Detachment by Shallow Flow at Low Slopes. *Soil Science Society of America Journal*. 1991;55(2):339–344.
8. Wischmeier WH, Smith DD. Predicting rainfall erosion losses. *Agricultural handbook*. 1978;537:65.
9. Kuznetsov MS, Bazarov OA. *Protivoerozionnaya stojkost' nekotoryh pochv Tadzhikestana* [Erosion resistance of some soils of Tajikistan]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Sci.] 1993;4:96–103. Russian.
10. Bulygin SYu, Mozheyko GA. *Parametry erozionnoj stojkosti pochv lesostepnoj zony Ukrainy* [Parameters of erosion resistance of soils of the forest-steppe zone of Ukraine]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science] 1995;6:768–774. Russian.
11. Shein EV, Karpachevsky LO, editors. *Teoriya i metody fiziki pochv. Kollektivnaya monografiya* [Theory and methods of soil physics. Collective monograph]. Moscow: Grif and K; 2007. 616 p. Russian.
12. Kuznetsov MS, Glazunov GP. *Eroziya i ohrana pochv* [Erosion and soil protection]. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 2004. 350 p. Russian.
13. Drogozov SE. *Vosstanovlenie struktury erodirovannyh pochv* [Restoration of the structure of eroded soils]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science]. 1993;6:45–51. Russian.
14. Shwebs GI. *Teoreticheskie voprosy pochvozashchitnogo zemledeliya* [Theoretical issues of soil protection agriculture]. *Vestnik sel'skhozaystvennoj nauki* [Bulletin of Agricultural Science] 1986;8:11–13. Russian.
15. Bulygin SYu, Komarova TD. *K ocenke vliyaniya mekhanicheskoy obrabotki na pochvu* [On the assessment of the impact of mechanical treatment on the soil]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science] 1990;6:135–138. Russian.
16. Tsybulko NN, Tsyribko VB, Zhukova II, Logachev IA. *Vodoustojchivost' struktury dernovo-podzolistykh pochv, podverzhennykh vodnoj erozii, na raznykh agrofonaх* [Waterproofness of the structure of sod-podzolic soils subject to water erosion on different agrophones]. *Nauchno-agronomicheskij zhurnal* [Scientific and agronomic journal]. 2024;1(124):40–47. Russian.

Статья поступила в редколлегию 24.10.2024.
Received by editorial board 24.10.2024.

ПЛАСТИКОВЫЕ ОТХОДЫ: ВЛИЯНИЕ НА ЭКОСИСТЕМУ ПЛАНЕТЫ

К. В. АМИРМЕТОВА¹⁾, Э. А. АЛИЕВ¹⁾

¹⁾Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
пр. Азадлыг, 20, AZ1010, г. Баку, Азербайджан

Пластиковые отходы, несмотря на их универсальность и широкий спектр применения, создают серьезную угрозу для экосистемы планеты. Мировое производство пластика увеличилось с 1,5 млн т в 1950 г. до 335 млн т в 2016 г. Хотя уровень переработки пластиковых изделий растет, однако большая часть оставшихся по-прежнему выбрасывается в окружающую среду. Первоначально общественное внимание в основном было сосредоточено на крупных пластиковых отходах. В последние несколько лет мелкие пластиковые фрагменты, особенно микропластик, вызывают все большую обеспокоенность из-за их загрязнения и рисков для окружающей среды. Они оказывают негативное воздействие на компоненты окружающей среды и здоровье живых организмов, включая человека. По оценкам ученых, пластик составляет до 54 % (по массе) антропогенных отходов, выбрасываемых в природу. Эти отходы часто накапливаются в таких экосистемах, как океаны, реки, почвы и даже воздушная среда. Урбанизация, активное экономическое развитие и рост населения способствуют увеличению объемов пластикового загрязнения, что усугубляет глобальную экологическую ситуацию. Впервые проблема загрязнения пластиком была зафиксирована в 1960 г., когда его частицы обнаружили в кишечнике морских птиц. С тех пор ситуация только ухудшилась: в наши дни микропластик повсеместно встречается в морях, почвах, реках, озерах, в воздухе, на пляжах. Более того, его частицы выявлены в питьевой воде таких стран, как Германия, Норвегия, США, Китай и др., что подчеркивает глобальный масштаб проблемы. В статье анализируется литература, посвященная источникам микропластика в атмосфере, гидросфере и почве. Проводится оценка его распространенности в экосистемах в виде отходов различных форм, размеров и цветов. Уделено внимание негативному влиянию микропластика на такие живые организмы, как рыбы, морские черепахи и птицы. Рассматриваются позитивные шаги, направленные на снижение загрязнения: переработка отходов, использование экологических материалов и повышение информированности общества.

Ключевые слова: пластиковые отходы; загрязнение окружающей среды; загрязнение воздуха; загрязнение почвы; загрязнение воды; микропластик; токсикологическое воздействие; здоровье человека; экологические последствия; устойчивое развитие.

PLASTIC WASTE: IMPACT ON THE PLANET'S ECOSYSTEM

K. V. AMIRMATOVA^a, E. A. ALIYEV^a

^aAzerbaijan State University of Oil and Industry,
20 Azadliq Avenue, AZ1010 Baku, Azerbaijan

Corresponding author: K. V. Amirmatova (konul.amirmatova@asoiu.edu.az)

Образец цитирования:

Амирметова КВ, Алиев ЭА. Пластиковые отходы: влияние на экосистему планеты. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;1:85–95 (на англ.).
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-85-95>

For citation:

Amirmatova KV, Aliyev EA. Plastic waste: impact on the planet's ecosystem. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;1:85–95.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-1-85-95>

Авторы:

Кенуль Вагиф Амирметова – аспирант кафедры материаловедения и технологии переработки; младший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории «Наноматериалы и нанотехнологии».

Эльман Аламгулу Алиев – кандидат экономических наук; заместитель заведующего Научно-исследовательской лабораторией «Наноматериалы и Нанотехнологии».

Authors:

Konul V. Amirmatova, postgraduate student at the department of materials science and processing technology; junior researcher at the research laboratory of nanomaterials and nanotechnology. konul.amirmatova@asoiu.edu.az

Elman A. Aliyev, PhD (economics); deputy head of the research laboratory of nanomaterials and nanotechnology. elmancam@gmail.com

Plastic waste, despite its versatility and wide range of uses, poses a serious threat to the planet's ecosystem. Global plastic production increased from 1.5 million tonnes in 1950 to 335 million tonnes in 2016. Although recycling rates for plastic products are increasing, much of the remainder is still discarded into the environment. Initially, public attention was mainly focused on large plastic waste. In the past few years, small plastic fragments, especially microplastics, have become increasingly concerned due to their pollution and environmental risks. They have a negative impact on environmental components and the health of living organisms, including humans. It is estimated that plastic makes up to 54 % (by weight) of anthropogenic waste discarded into nature. This waste often accumulates in various ecosystems such as oceans, rivers, soils and even the air. Urbanization, rapid economic development and population growth contribute to the increase in plastic pollution, which worsens the global environmental situation. The problem of plastic pollution was first recorded in 1960, when plastic particles were found in the intestines of seabirds. Since then, the situation has only worsened; today, microplastics are ubiquitous in the seas, beaches, soils, rivers, lakes and air. Moreover, plastic particles have even been found in drinking water in countries such as Germany, Norway, the United States, China and elsewhere, highlighting the global scale of the problem. This article reviews the literature on the sources of microplastics in the atmosphere, hydrosphere and soil. It also assesses their prevalence in ecosystems in the form of waste of various shapes, sizes and colours. Particular attention is paid to the negative impacts of microplastics on living organisms such as fish, sea turtles and birds. In addition, positive steps aimed at reducing pollution are discussed: recycling, using eco-friendly materials and raising public awareness.

Keywords: plastic waste; environmental pollution; air pollution; soil pollution; water pollution; microplastic; toxicological impact; human health; ecological consequences; sustainable development.

Introduction

Since its introduction in the early 20th century, plastic has revolutionized industries due to its durability, flexibility, and low cost. Used in everything from packaging to automotive parts, medical devices to electronics, plastics are integral to daily life. Most plastics are made from petrochemicals, though bioplastics are derived from renewable sources like corn starch or cellulose. Despite their benefits, the widespread use and disposal of plastic have caused serious environmental issues. First invented in 1860, plastic production began in 1907 and expanded significantly in the 1920s. By 1950, global production was around 2 million tons, reaching 368 million tons by 2019 [1; 3].

Thus, plastic consumption has increased approximately 180-fold from 1950 to 2018. It is expected that plastic production will continue to grow exponentially in the future. According to source [4], global plastics production has grown exponentially: over 380 million tons are produced annually, with about 50 % of this volume consisting of single-use products that are discarded within a year of purchase. According to source [5], of the 275 million tons of plastic waste, between 4.8 and 12.7 million tons are dumped into the sea.

Plastics can generally be divided into «biological (also known as organic polymers)» or «engineering» plastics. According to source [2], about 4 % of fossil fuels are used for plastics production. Discarded plastic waste can accumulate in various natural habitats. The first evidence of plastic in the wild was discovered in the guts of seabirds, as reported in 1960. Available data indicate a growing impact related to public health issues resulting from the current use of plastics.

Plastic pollution poses a significant global environmental challenge for several reasons. The production, transportation, and disposal of plastics release substantial greenhouse gases, contributing to climate change. Moreover, plastic waste disrupts natural ecosystems and impacts carbon storage processes in soils and oceans, hindering the carbon cycle. Plastics can persist in the environment for centuries, with decomposition timelines ranging from 100 to 1000 years, during which they pollute surrounding air and water. Thin films less than 20 microns thick clog drainage systems in many cities, causing uncontrolled flooding during the rainy season. Plastic waste is estimated to kill a million marine creatures every year. Marine animals may mistake these particles for food, causing internal injuries, blockages, and starvation. The clogging of plastic bags has led to bans on the use of thin plastic bags in light industry during retail sales in many countries [3].

Microplastics, particles smaller than 5 millimeters, can absorb pollutants like pesticides and heavy metals, leading to bioaccumulation and toxicity in soil organisms. Additionally, microplastics have been detected in drinking water, seafood, and air, raising concerns about potential health impacts on humans, including the possibility of ingesting these particles through food [1; 4]. Microplastics can be classified into different size categories:

1. Large microplastics (1–5 mm) – The largest microplastic particles, visible to the naked eye. They often originate from the fragmentation of larger plastic debris, industrial resin pellets (nurdles), or microbeads used in personal care products.

2. Small microplastics (0.1–1 mm) – These particles are smaller and more difficult to detect without magnification. They can result from further degradation of plastic materials, synthetic fibers from textiles, or abrasion of rubber products (e. g., tire wear).

3. Nanoplastics (<100 nm) – The smallest plastic particles, often at the nanoscale, making them particularly concerning. Due to their minuscule size, they can penetrate biological membranes, enter cells, and accumulate in tissues, potentially leading to toxic effects on organisms [1–5].

This article analyzes literature to identify sources of microplastics in the atmosphere, hydrosphere, soil, and living organisms. It provides assessments of the prevalence of microplastics in the ecosystem in various forms, sizes, and colors of plastic waste. The impact of microplastics on various living organisms, including fish, sea turtles, and seabirds, is discussed. We also explore positive interventions aimed at reducing the negative consequences of plastic waste.

Impact on the Atmosphere. The study [11] conducted field investigations on unregulated plastic burning based on measured PM_{2.5} emissions. It was found that the burning process leads to the unintentional release of 0.92 ± 0.53 Mt of aerosols worldwide, with most emissions originating from developing countries. The largest amount of aerosols is produced by China (166 ± 96 kt), followed by India (112 ± 64 kt), Brazil (85 ± 49 kt), Indonesia (72 ± 41 kt), and the Russian Federation (58 ± 33 kt). Even in Europe, a small portion of unregulated burned plastic waste unexpectedly releases 30 ± 17 kt of aerosols. These aerosols generated from unregulated burning of commercial plastics contain numerous hazardous chemicals, which unintentionally released 705 ± 378 t of PAHs, 23 ± 11 kg of PCDDs/Fs, and 487 ± 135 kg of PCBs worldwide, respectively. The results show that people living in developing regions are at higher risk of toxic exposure from plastic burning than those living in developed regions [6].

The study referenced in [10] examined potential sources of microplastics in the atmosphere of 11 remote U.S. reserves and measured their deposition rates. The research focused on both primary microplastics, which are manufactured at a specific size (e. g., microbeads), and secondary microplastics, which arise from the breakdown of larger plastic items due to physical wear or ultraviolet exposure [6]. A total of 236 samples were collected after precipitation, and 103 samples were collected dry. Results showed microplastics in 98 % of all wet and dry samples. The particle sizes ranged from 4 to 188 μm , while fibers varied between 20 μm and ~ 3 μm , with an average width of 18 mm and depth of 6 mm. One key factor in the transportability of plastics is their relatively low density ($0.65\text{--}1.8$ g/cm³), which is lighter than that of soil particles (~ 2.65 g/cm³). Additionally, the larger surface area-to-volume ratio of plastic fibers increases their drag forces, which slows down their rate of deposition [10].

While atmospheric microfibrils have recently been detected in Europe and the Arctic [9], the exact pathways through which primary and secondary microplastics (such as microfibrils and particles) enter the atmosphere are still not fully understood. Data collected in recent studies were compared with previous findings from 2018, revealing that microplastics deposited through wet conditions come from different regions compared to those deposited dry. Larger and fewer microplastics were found in wet deposits, which showed a correlation with both dust deposition and population density, suggesting that regional storms play a key role in transporting and depositing these particles. On the other hand, dry deposition appears to be linked to large-scale global dispersion, pointing to the widespread transport of microplastics. These particles are often found far from their original production sites, even in remote areas like Antarctica, far from industrial hubs [6; 9]. Regional storms are particularly important for delivering larger plastics to national parks, with dry deposits making up over 75 % of the plastic mass found. This suggests that plastics, while possibly originating in urban centers, can accumulate in the atmosphere over time, traveling long distances before being deposited under favorable conditions, such as slower air mass speeds or the presence of mountain ranges [10].

The study in article [11] examined atmospheric microplastic deposits in a pristine mountain watershed in the French Pyrenees during the 2017–2018 winter. Over five months, samples were collected representing both wet and dry atmospheric deposits. The microplastics identified included fibers up to approximately 750 μm and fragments smaller than 300 μm . The daily average deposition rate was 249 fragments, 73 films, and 44 fibers per square meter. Air mass trajectory analysis revealed that microplastics were transported through the atmosphere from distances of up to 95 km. The findings highlight that microplastics can impact even remote, sparsely populated regions via atmospheric transport. During the monitoring period from January to March, the samples also contained fine orange quartz-like dust, which had characteristics typical of Saharan dust (grain size ~ 8 μm , color, and chemical properties), indicating that some of the microplastics may have originated from the Sahara, North Africa, or the Iberian Peninsula. This further illustrates the distance that plastic particles are capable of traveling.

The length of plastic fibers found in atmospheric deposition samples suggests a predominant fiber length of 100–200 μm and 200–300 μm . The longest fiber identified as plastic in this mountain field study was 3000 μm .

The composition of plastic deposits varied during the study period. The diversity in plastic composition could be attributed to factors such as the source of the plastic particles, which influences wind direction and strength, as well as the occurrence of storms and the length of calm periods in comparison to storm events. Polystyrene (PS), primarily in the form of fragments, was the most abundant plastic found in the samples, followed by polyethylene (PE). PS and PE are commonly used in single-use plastic products and packaging. Along with polypropylene (PP), these three plastics constitute the majority of atmospheric deposits at this location [11]. Numerous studies have indicated that controlled burning of various plastic materials, simulating open-air burning, generates a range of toxic compounds, including volatile and semi-volatile substances, organic compounds, and harmful metals [11; 13]. The distance over which microplastic particles can be transported is currently unknown, and further research based on events is needed to determine the source and vectors of atmospheric microplastic particle transport [16].

In the study [12], laboratory experiments were conducted on the burning of industrial polymer materials, simulating open fire conditions. The experiment utilized various types of plastics, including poly(vinyl chloride) (PVC), low-density polyethylene (LDPE), high-density polyethylene (HDPE), polystyrene (PS), polypropylene (PP), and polyethylene terephthalate (PET). Smoke and solid particle samples (soot) were collected on filters, and solid ash residues were produced under controlled combustion at temperatures between 600–750 °C. The analysis focused on the emissions of solid particles, persistent free radicals embedded in the polymer matrix, heavy metals, and other elements in both soot and ash samples. Results revealed that all plastics combust easily, generating charred residues, solid ash, and black smoke particles. Toxic persistent carbon- and oxygen-centered radicals were found in both soot particles and ash residues, which are known to have harmful effects when inhaled. Heavy metals such as lead (Pb), zinc (Zn), chromium (Cr), nickel (Ni), and cadmium (Cd) were detected at low levels, while higher concentrations of lithophile elements like sodium (Na), calcium (Ca), magnesium (Mg), silicon (Si), and aluminum (Al) were present in soot and ash residues [7].

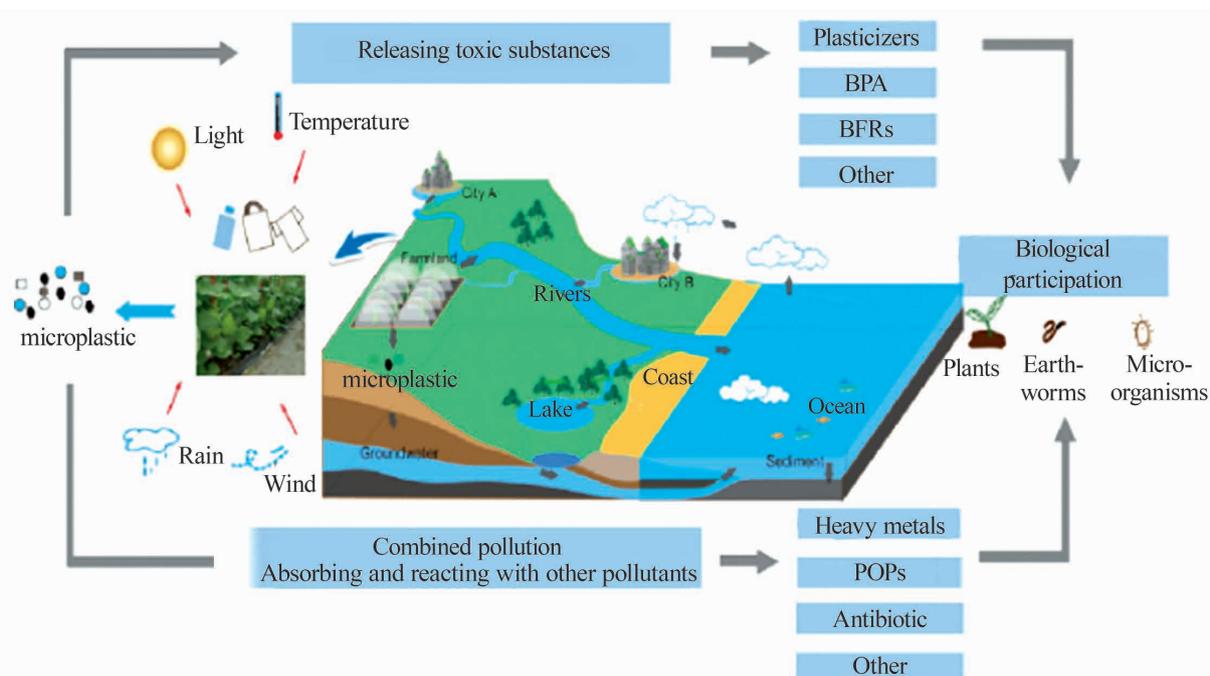
Understanding the primary mechanisms behind plastic emissions into the atmosphere is essential for creating scalable solutions. While the full ecological impact remains unclear, it is an unavoidable issue that will become increasingly evident. To effectively reduce the potential risks posed by microplastics in the environment, both the scope of the solution and the degree of global cooperation required call for widespread involvement from the international community [10].

Impact on Soil. As early as 2012, researchers first assessed the potential of soil contamination with microplastics [16]. Statistical data from 2016 showed that approximately 63,000 and 44,000 tons of plastic products were used annually on agricultural lands in Europe and North America, respectively [16].

According to a 2018 study, it was estimated that about 44,000–300,000 and 63,000–430,000 tons of MP annually enter agricultural lands in North America and Europe through wastewater [12].

If plastic is not recycled and discarded immediately after use, most of it persists in the environment for tens to hundreds of years. Moreover, plastic will break down into smaller plastics under the influence of physical, chemical, and biological factors [13]. Plastics can fragment into MPs under UV radiation and elevated temperatures on the soil surface, degrade by insects and gut microorganisms, and migrate deeper into the soil due to soil organism movement and anthropogenic activities (Fig.) [12; 14].

In some 2016 studies, 0.03–6.7% of plastic was found in the surface layer of soil along roads in industrial zones [14; 16].



Microplastics and soil [12]

It was estimated that MPs in soil mainly arise from irrigation with wastewater; sediments that enter the soil ecosystem. Plastic film in agricultural production is the main source of MPs in agricultural soils, for example, vinyl tunnels, plastic film mulching [13; 14; 16]. Plastic mulching is widely used for preserving heat, retaining water, fertilizers, and improving soil in agricultural activities [12; 16].

Furthermore, under the action of wind and water, some MPs migrate horizontally to other parts of the land or into the atmosphere or rivers. Others remain and can be transported vertically in the soil, eventually being transported to deep soil. MPs in the soil can adsorb other pollutants, such as persistent organic pollutants and heavy metals, making them more harmful in the long term, they can adsorb some contaminants (such as pesticides, antibiotics, and heavy metals) and transport them to organisms, which can have a strong toxic effect [13].

Article [13] comprehensively investigated microplastics in agricultural soils in Northwest China. Microplastics were found in all soil samples from Shaanxi Province, indicating significant soil contamination. MP concentrations ranged from 1430 to 3410 particles/kg. Fibers and small particles (0–0.49 mm) were the predominant types and sizes, respectively. Polystyrene (PS), polyethylene (PE), polypropylene (PP), high-density polyethylene (HDPE), polyvinyl chloride (PVC), and polyethylene terephthalate (PET) particles were detected in the agricultural soils.

The authors' research [13] also demonstrates a correlation between microplastic content in agricultural soils and soil planting type and climatic factors. The study results confirmed high MP levels in agricultural soils and showed that agricultural activities likely caused this MP soil contamination.

Study [14] investigated microplastic contamination of agricultural lands in the suburbs of Wuhan, central China. The study found that MP concentrations near suburban roads were 1.8 times higher than in residential areas, posing a potential threat to vegetable cultivation along roadsides. Results showed that microplastic content ranged from 320 to 12,560 particles/kg of dry weight. Microplastics less than 0.2 mm in size predominated, accounting for 70 % of the total volume. Fibers and microbeads were the main types of microplastics. Polyamide (32.5 %) and polypropylene (28.8 %) were the dominant polymer types identified.

In article [15] soil samples from 15 agricultural lands in Schleswig-Holstein, northern Germany, were analyzed to examine the abundance, distribution, and composition of MPs in the size range of 1 to 5 mm. Particle content in sampling units ranged from 0 to 217.8 MPs per kg of dry weight, with an average content of 3.7 ± 11.9 MPs per kg of dry weight per unit area. While MPs were found in all study sites, only 34 % of the sampling units contained synthetic particles.

Comparing German and Chinese data suggests significantly lower microplastic contamination levels in German agricultural soils. However, the size range of MPs considered in the German study was limited.

Study [16] examined 20 agricultural sites near Shanghai for microplastics (20 mm – 5 mm) and mesoplastics (5 mm–2 cm). Three replicate soil samples were collected from shallow (0–3 cm) and deep (3–6 cm) soil layers at each site. Microplastic content was 78.00 ± 12.91 and 62.50 ± 12.97 particles/kg in shallow and deep soils, respectively. Mesoplastic counts were 6.75 ± 1.51 and 3.25 ± 1.04 particles/kg in shallow and deep soils. 48.79 and 59.81 % of these micro/mesoplastics were < 1 mm in size in shallow and deep soils, respectively. Fibers, fragments, and films were the main microplastic morphologies, predominantly black or transparent. Higher concentrations and larger sizes of micro/mesoplastics were found in the topsoil compared to deeper soil. Polypropylene (50.51 %) and polyethylene (43.43 %) were the dominant polymers, suggesting that plastic mulching and wastewater sediment are major sources of microplastic contamination in these agricultural lands.

Studies in 2016 and 2019 demonstrated a significant impact on soil enzyme activity. Furthermore, these studies concluded that MPs can alter key ecological functions and biogeochemical processes in the soil environment. Research in 2017 investigated how MP accumulation accelerates the enzymatic activity of organic compounds containing phosphorus, nitrogen, and carbon, allowing them to accumulate in dissolved form [12].

Study [17] examined the effects of polyethylene microplastics, polyethylene resins, and plastic additives on soil nitrogen content, physicochemical properties, nitrogen cycle functional genes, microbial composition and nitrogen transformation rates. Polyethylene microplastics and additives increased dissolved organic nitrogen, while polyethylene resin decreased it and showed a higher microbial biomass. It was proven that plastic additives, unlike polyethylene microplastics and resin, hinder organic decomposition and microbial immobilization of soil nitrogen. They have a significant, specific impact on microbial community structure, inhibit nitrogen transformation rates, and ultimately affect the nitrogen cycle.

The study mentioned in [18] reports that, under constant moisture conditions, soil microbial biomass, enzyme activity, and functional diversity tended to decrease with increasing concentrations of plastic mulch residue. Given the widespread and often improper use of plastic mulch in some agro-ecosystems, studying the soil microbiome can provide insights into the long-term consequences of plastic pollution on land.

According to research cited in [12], MPs in soil are responsible for disrupting soil structure, reducing the soil's infiltration capacity for rain and irrigation water, and negatively affecting the soil's water retention capacity. 2018 research indicates that MPs in soil significantly alter soil structure, including its porosity. In large quantities, these particles or fibers fill and block soil pores, ultimately reducing the soil's infiltration capacity. This disrupts nutrient cycling in the soil, alters microbial structure, and ultimately affects crop growth.

Agricultural and urban soils are considered major reservoirs for MPs. Plastic residues from mulching, over time and through environmental weathering, break down into MPs. These MPs disperse in the soil and associate with other pollutants like heavy metals, pesticides, and persistent organic pollutants, causing combined toxic

effects on soil flora and fauna. These MPs can ultimately be transported to rivers, oceans, and other water bodies via agricultural runoff, spreading contamination to other ecosystem components such as rivers and lakes [14; 15].

Impact on the Hydrosphere. Plastic has become an important component of human life, widely used in packaging, construction, and consumer goods production. According to 2017 studies, 8.3 billion metric tons of plastic were produced between 1950 and 2015. According to UNEP studies from 2017 and 2018, 12 % of plastic waste is incinerated, 9 % recycled, and 79 % discarded in landfills [19; 20].

Unfortunately, the presence of plastics in the aquatic environment is inevitable, especially considering modern plastic usage and waste management practices. For example, the main sources of ocean plastic pollution are land-based sources (70–80 % of the pollution). MPs can reach seas and oceans through various pathways: river and atmospheric transport, beach littering, and directly through marine activities such as fishing, shipping, and aquaculture [22].

Once in the marine environment, unmanaged plastic waste never disappears. Its low degradation rate and chemical stability increase the accumulation rate of plastic in millions of tons in the marine environment. Larger pieces of plastic waste break down into smaller particles due to mechanical degradation, oxidation, fragmentation, and ultraviolet radiation. Thus, macroplastics (> 25 mm) break down into microplastics (< 5 mm) and then into nanoplastics (< 1 µm) [22; 24].

Despite the fact that plastic components come in various forms, a 2020 study showed that more than 64% of plastic particles in surface waters are in the form of fibers, with the rest being fragments [20]. Given the size of plastic particles, it can be assumed that plastic waste is present not only in water but also in biota (e. g. fish, turtles, bivalves) and sediments [19; 22].

MPs, when entering marine organisms, simultaneously cause numerous negative effects on their vital activities. Moreover, MPs and the additives they contain are transferred through the food chain from the lower trophic levels to the upper ones in the marine environment, and eventually to humans. Therefore, every process, from the sources of MPs entering the marine ecosystem to their impact on marine organisms, should continue to be studied by researchers and closely monitored [19; 20].

In a 2024 study [21], samples from the northeastern coast of Venezuela (NECV), the Pacific and Arctic Oceans (PAO), and the Gulf Stream (GSC), each of 0.5 liters in volume, were examined. According to the data obtained, the overwhelming majority of plastic pollutants in individual samples of seawater from the NECV, PAO, and GSC regions were MPs smaller than 6 micrometers in size. The concentration of MPs in the NECV samples was approximately 10 times higher than in the PAO and GSC samples. Moreover, the concentration of MPs was significantly higher along the northeastern coast of Venezuela compared to the less anthropogenically impacted stations in the Pacific and Arctic Oceans and the Gulf Stream. Qualitative and quantitative analysis of the polymers in the NECV, GSC, and PAO samples showed the presence of micro-polymers in the following order (PP > PcCu > PS > PE > PET) [21].

In [22] plastic waste data were analyzed across three marine compartments of the South American Atlantic coast in Latin America, the Caribbean, and South America. This study highlighted that Brazil, the largest country in South America, ranked 7th among the countries discharging microplastic waste into the oceans from rivers. Despite this, 80 % of emissions came from only 75 rivers. Five major hotspots for microplastic waste discharge from Brazil into the Atlantic Ocean were identified: the La Plata River estuary between Argentina and Uruguay; Guanabara Bay; the Amazon River; the São Francisco River; and the Tocantins River. Domestic wastewater was identified as the primary source of these materials entering the ocean, particularly in densely populated coastal areas such as the Bahia Blanca estuary (Argentina) and the bays of Guanabara and Todos os Santos (Brazil). The most common polymers in the samples were microfibers of polyethylene (PE) and polypropylene (PP). In studies collecting macroplastics from beaches, these materials accounted for an average of 70 % of items larger than 25 micrometers.

According to [24], among the 25 trillion plastic particles present on the surface of the world's oceans, the Indian Ocean contains 4 billion MPs/km². This is partly due to the fact that India ranks 12th in terms of its contribution to ocean waste disposal, with a coastline of about 8000 km and in 2022 India was estimated to produce about 25 903 tons of plastic waste per day.

For a deeper understanding of plastic presence not only in the water column but also in marine organisms, oysters, known as effective filter feeders, are the most suitable model as bioindicators of plastic pollution. Thanks to their efficient filtering capabilities, contaminants can accumulate in oyster bodies, which have limited self-cleaning and expelling capabilities.

Studies in the Wadden Sea show widespread microplastic contamination in benthic-feeding seabirds, specifically common eiders and shelducks. Almost all eiders (92.9 %) and shelducks (95 %) had ingested plastic, primarily small, colorful threads (<5 mm). This indicates regular ingestion and excretion, highlighting significant habitat contamination. High microplastic levels, coupled with declining bird populations, raise concerns about potential

health risks. Long-term ecotoxicological studies are needed. The UN Environment Programme and UNESCO are developing monitoring guidelines for ocean plastic pollution. Regional studies and hydrodynamic modeling are crucial for assessing the impact of land-based plastic input [22; 23].

In [24] 500 samples of *Saccostrea cucullata* oysters were examined. Samples were taken from 5 sites in the intertidal zone along the Gujarat coast, India. It was found that each sample contained microplastic particles, with a concentration of 2.72 ± 1.98 MPs/g. A negative correlation was found between shell length and the amount of MPs. Predominantly fibers were registered in all research samples. The main colors were black, blue, and red microplastics, measuring 1–2 mm in size. The polymer composition of the MPs was identified as polyethylene terephthalate and polypropylene. The intertidal zone of Shivrajpur showed the highest recorded MP level, followed by Dwarka, Veraval, Diu, and Vanakbara. Based on the chemical composition of these identified polymers, potential sources of MPs in the ocean may include plastic waste, fishing activities, and sealants.

Microplastics in drinking water have garnered attention following reports of their widespread detection worldwide. Records of microplastics in freshwater environments continue to expand and update, especially in rivers, lakes, reservoirs, and groundwater. Targeted studies on the presence of microplastics in drinking water began in 2018, initially focusing on bottled water. Despite the late start, knowledge of microplastics in drinking water is rapidly growing [25].

In [20] tap water samples were studied. The study showed that up to 83 % of them contained microplastic fibers. In terms of composition, 2023 studies showed that polyethylene, polyester, propylene, polyamide, and polyethylene terephthalate were detected in drinking water in descending order of concentration. These findings highlight potential health risks, as microplastics can enter the human body primarily through drinking water, which serves as a significant exposure pathway.

Microplastics have been found in drinking water worldwide, including bottled water, tap water, and water from treatment plants in Europe, Asia, and the Americas. The concentrations of microplastics vary due to differences in study methodologies. The most common types identified were fibrous and fragmented particles made of polyester, polyethylene, polypropylene, and polystyrene, with sizes typically under 10 micrometers. The levels of microplastics varied by region and water type, and the color of the particles was generally not emphasized in the studies [25].

The collected data shows that microplastics are widespread in drinking water, with recorded concentrations varying greatly. Further research is needed to improve sampling and analysis of microplastics in drinking water, especially nanoplastics. There is a need to better understand the occurrence and fate of microplastics throughout the water supply chain. The results of previous and subsequent studies provide baseline information on MP contamination levels, which can be used to monitor the future impacts of MP contamination [22]. Ingested microplastic particles are already associated with harmful effects on animals, raising concerns about similar consequences for humans.

Plastic and living organisms. Microplastics are widespread in marine environments. For example, fibers have been detected in the deep waters of the northeastern Atlantic at 70.8 particles/m³. Due to their small size, they easily enter marine organisms [27]. Along the Turkish Mediterranean coast, 1,822 microplastic particles were found in the digestive tracts of 1,337 fish, mostly fibers (70 %) and hard plastics (20.8 %). In China, MPs were detected in 26 fish species, making up 55.9–92.3 % of plastic debris per species. Marine fish are especially prone to ingesting particles under 500 µm, increasing bioaccumulation risks. Higher MP concentrations have been observed in deep-sea fish, though both pelagic and demersal species are affected, facilitating microplastic transfer through marine food webs [23; 24; 27].

The presence and impact of plastic waste on organisms have been increasingly studied in recent years. During the production of plastics, various chemicals are added to improve the mechanical, chemical, and physical properties of the products. Additives are chemical substances introduced during manufacturing to perform various functions [26]. These chemicals include antioxidants, lubricants, corrosion inhibitors, plasticizers, adhesives, thermal stabilizers, and flame retardants (FR). It is known that plastics contain 10 000 different chemicals in the form of «chemical additives» that are not covalently bonded to the original polymers [29; 26].

More than 2 500 additives have been identified in the global market. These chemicals have attracted attention due to the growing amount of plastic waste being discharged into the ocean, leading to the leaching of these additives and potential impacts on biota [26]. However, only 25 % of plastic additives are characterized as potentially hazardous to the environment. Since plastic additives are not covalently bonded, they can freely leach into the environment. Due to their presence in various environmental conditions, additives possess significant ecotoxicity. There is an inevitable threat of human exposure to plastic additives as they are part of the «big three» – air, water, and food [26].

These chemicals have been found in aquatic ecosystems as well as in various organisms exposed to them. In ecosystems, the impact of additives on species occurs when microplastics or additives bioaccumulated in prey species are ingested, inhaled, or absorbed through the skin from the surrounding water. This exposure causes a range of potentially adverse effects, such as inhibition of microalgae growth, reduced fertilization and reproduction in

mussel species, and increased mortality in fish species. Some additives have already been restricted in certain countries due to their potential to disrupt the endocrine system [26].

Microplastics can act as carriers, accumulating and transferring organic pollutants and heavy metals on their surfaces, leading to the bioaccumulation of contaminants and toxins in the aquatic environment [35]. Translocation of MPs through the gastrointestinal tract has been demonstrated in laboratory studies on crabs and mussels. The presence of MPs in tissues outside the gastrointestinal tract in fish has yet to be evaluated. However, one study reported the presence of MPs in the liver of fish fed with plastic particles [30]. Many studies have shown that microplastics are highly efficient adsorbents of hydrophobic/hydrophilic organic pollutants [35; 31].

In the study [39] marine organisms such as *Mytilaster lineatus* and *Amphibalanus improvisus* were examined as biomonitors of MP pollution in the Caspian Sea. Samples were collected from nine areas along the coastal waters of the southern Caspian Sea between July and September 2022. A total of 25 specimens of *Mytilaster lineatus* and 25 specimens of *Amphibalanus improvisus* were collected from each area. The study revealed that microplastics were detected in all analyzed organisms. On average, 1.69 ± 0.79 particles per individual or 7.96 ± 3.231 particles per gram of wet weight were found in *M. lineatus*, while 1.8 ± 0.9 particles per individual or 35.18 ± 35.33 particles per gram were found in *A. improvisus*. Most of the detected microplastics were 1000–3000 μm in size, primarily composed of polyamide, and had a black fibrous shape.

It is widely known that seafood is one of the most beneficial food sources for humans, mainly due to its high protein content. Unfortunately, it is also reported that microplastics enter, are absorbed, or bioaccumulate in marine organisms. For example, in the study [32], more than 200 μm were found in the digestive tract of 277 out of 390 individuals from 26 different species of edible fish, mollusks, and crustaceans. According to the study, no signs of bioaccumulation were found in the muscle tissue of fish, mollusks, and crustaceans. The research results confirm that carnivorous species suffer the most from microplastic ingestion. Carnivorous species had the highest prevalence of plastic ingestion, at $79 \pm 9.4\%$, followed by planktonic species at $74 \pm 15.5\%$, and detritivores at $38 \pm 36.9\%$, suggesting trophic transfer [32].

Thus, both solid particles and chemical additives leached from microplastics (MPs) contribute to environmental MP pollution. The global plastic additives market is expected to grow at an average annual rate of 5.7% from 2021 to 2028, with the market size increasing from \$51.04 billion to \$75.20 billion [29]. Therefore, several knowledge gaps remain concerning chemical additives in plastics, including their presence, transfer, human exposure, and the risks associated with these additives for human health and ecosystems [29].

Microplastics as carriers of toxic substances. Microplastics are essential carriers for a range of potentially hazardous substances, including metals like Pb, Cd, Fe, Mn, Zn, Cu and ect. as well as hydrophobic organic contaminants such as polyaromatic hydrocarbons (PAHs), organochlorine pesticides, and polychlorinated biphenyls.

Additionally, metal-based catalysts used in the production of water bottles can enter drinking water. The release of antimony (Sb), used as a catalyst in industrial PET plastic bottles, has been demonstrated at high temperatures (60–85 °C). Since Sb can cause health effects (nausea, vomiting, and diarrhea), it is advisable to avoid using plastic bottles of this type and storing them at elevated temperatures that degrade water quality. Another study showed the accumulation of Zn in the earthworm *Lumbricus terrestris* exposed to Zn-associated PE fragments, with Zn desorption in the synthetic earthworm gut being higher from these MPs (40–60%) than from soil (2–15%) [30].

Recently, attention has focused on the role of microplastics in the adsorption of heavy metals from aquatic environments. Lead, a metal that can cause diseases in humans, such as mental retardation, kidney and nervous system damage, cancer, etc., is widely used in the electroplating, steel, electrical, and explosives industries. However, as far as is known, little effort has been made to study the adsorption role of microplastics for lead ions and related mechanisms [35].

Studies [31] show that depending on the physicochemical properties of MP surfaces, adsorption behavior can vary significantly. Therefore, the adsorption process of Pb^{2+} , Cu^{2+} , and Cd^{2+} metals on MPs should be easily influenced by other environmental media. For example, pH can significantly affect metal sorption on MPs, while ionic strength has relatively little effect on this process. It has been found that the sorption affinity of the three metals to model MPs followed the order of HDPE > PVC > LDPE > PP. Moreover, Pb^{2+} demonstrated significantly stronger sorption than Cu^{2+} and Cd^{2+} , which is explained by strong electrostatic interactions. This study shows that depending on the surface physicochemical properties of MPs, sorption behavior can vary significantly, providing additional information about the behavior of MPs as metal carriers.

Wastewater and cultivation zones are typical sources of heavy metal pollution, and microplastics may be key carriers of its transport in marine systems. A study on the adsorption of heavy metals (lead, copper, and cadmium) by microplastics found that various types of plastics – polyvinyl chloride (PVC), polypropylene (PP), polyethylene (PE), polyamides (PA), and polyoxymethylene (POM) – differ in their ability to adsorb these metals. PVC and PP exhibited higher adsorption compared to PA, PE, and POM. The adsorption was influenced by factors like ion concentration,

adsorption time, and particle size. The study also noted competition between different heavy metals for adsorption sites on microplastics, with varying selectivity, suggesting the need for further research on this process [34].

The study [10] examined the adsorption behavior of trace elements (Cd, Cr, Cu, Co, Ni, Pb) on polyethylene (PE) and found that aged PE has higher adsorption capacity than primary PE. It was established that pH value and residence time of microplastics in the environment are important factors influencing the metal ion adsorption capacity on PE under freshwater conditions. The amount of adsorbed lead (II) decreased with increasing sodium chloride concentration but increased with increasing pH. Adsorption efficiency was about 91 % at pH 6.

Previous studies confirmed that heavy metal ions can adsorb onto primary PS beads (polystyrene) and aged PVC fragments (polyvinyl chloride) in seawater. Additionally, 2012 studies confirmed that plastic resin pellets can be a significant transport vehicle for metals in the marine environment.

The study [27] examined the relationship between microplastics and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in marine organisms from Sanggou Bay. The results showed that the concentration of microplastics and PAHs ranged from 1.23 ± 0.23 to 5.77 ± 1.10 items/g, and from 6.98 ± 0.45 to 15.07 ± 1.25 $\mu\text{g}/\text{kg}$, respectively. The analysis of PAH concentrations in organisms revealed the presence of 16 types of PAHs, with 2–3 ring compounds, particularly naphthalene, contributing the most. Microplastics ranging from 30 to 500 μm showed a particularly strong positive correlation with the human risk posed by PAHs, suggesting that smaller microplastics may adsorb more PAHs, thereby contributing to increased human health risks. Six types of microplastic components were identified in the organisms of Sanggou Bay, including polystyrene (PS), polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET), cellulose, and cellophane. The main microplastic component in organisms is PE, with a proportion ranging from 37.1 to 56.1 %. Additionally, important microplastic components include cellulose, polyethylene, and polypropylene.

A major concern is the possibility of marine organisms mistaking these microplastics for food and indiscriminately consuming them, thereby being exposed to many hazardous pollutants, including persistent organic pollutants (POPs), such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs), polybrominated diphenyl ethers (PBDEs), and dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT), as well as heavy metals, which adsorb onto their surfaces from the environment. These additives also become bioavailable to marine biota upon ingestion and can have various harmful effects on marine life, such as altered metabolic and reproductive activity, reduced immune response, oxidative stress, cellular or subcellular toxicity, inflammation, and cancer [33].

The article [40] mentions the term «plasticosis» to describe a recently discovered disease directly linked to microplastic exposure and its toxicological effects in seabirds. The unintentional ingestion and accumulation of microplastic particles in the digestive system lead to chronic inflammation, causing significant tissue alterations. This disease, named «plasticosis», was first identified in *Ardenna carneipes* seabirds inhabiting Lord Howe Island, Australia. Additionally, aside from scar tissue formation, plastic exposure has been associated with slowed chick growth, changes in blood chemistry, and severe tissue damage in seabirds.

Recent studies highlight seafood consumption as a major pathway for microplastics to enter the human body. While the health risks of microplastic pollution are a concern, the long-term effects remain largely unknown. More research is needed to fully understand these impacts and develop effective solutions. As awareness of the issue grows, there is increasing demand for measures to reduce plastic use and improve waste management to protect both human health and the environment.

Solutions. In the world we live in, plastic is ubiquitous. Without proper disposal methods, dumping or burning these polymers can cause serious risks, such as heart failure, serious respiratory problems including asthma and emphysema, vomiting, kidney or liver damage, and reproductive system damage. Unfortunately, there is no single effective method to address the issue of plastic pollution of the ecosystem. Although the potential risk associated with plastic waste will likely vary depending on the type of plastic, they still have a negative impact on the environment. Today, a range of measures are being used to address these issues, including: recycling technologies, legislative initiatives, public and corporate initiatives, international cooperation.

There are currently several technologies available for the management of solid plastic waste. These include chemical, physical, and biological treatment methods. However, each has its own drawbacks. Chemical methods cannot be used in large-scale operations because the chemicals used to break down plastic create huge amounts of chemical waste. The waste incineration process (a physical method) eliminates the need for landfills and produces energy that can be used for other purposes. However, the gases released during the combustion of plastic waste are extremely hazardous and can cause a number of respiratory diseases. Biological methods of converting organic polymers into methane and manure through microbial intervention are applicable to certain groups of waste. Unfortunately, not all plastic can be replaced with biodegradable plastics today [41].

Legal regulations target reducing plastic waste through bans on single-use plastics, mandatory recycling, and eco-friendly packaging requirements. Phasing out single-use plastics could cut aquatic plastic waste by 40 %. The EU set a 55 % plastic recycling target by 2030. Denmark pioneered a plastic bag tax, while Germany will introduce a «plastic tax» in 2024. France will ban plastic-wrapped newspapers from 2025 but postponed restrictions on

styrene-based products. Norway banned plastic straws and cutlery in 2021 and Taiwan aims to eliminate single-use plastics in restaurants and businesses by 2030 [41; 42].

In 2013 China introduced a temporary restriction on waste imports, calling it the «Green Fence». In 2017, China announced a ban on the import of non-industrial plastic waste. Following the 2019 G20 summit in Osaka, Japan committed to reducing marine plastic waste. To prevent pollution of Boracay, the Philippine government closed the island to tourists from April 2019 for 6 months [41].

Programs aimed at gathering plastic waste like bottles and packaging can be organized, with designated collection points and specialized disposal efforts. For instance, the «Ocean Cleanup» initiative works to remove plastic debris from oceans and rivers using floating barriers and filtration systems. The Ocean Plastics Initiative (PI) seeks to promote sustainable plastic production and consumption, ultimately aiming for a waste-free plastics economy. NGO One Island One Voice led a massive effort by more than 20 000 people to clean up 120 beaches around the popular Indonesian island of Bali in March 2018 [34–38; 41].

Article [43] discusses how technology and policy can jointly address microplastic pollution. For instance, plastic fees and taxes have funded cleanup efforts in U. S. cities like Oakland and Washington, D.C. Technological solutions complement policies by tracking emissions and reducing harmful chemicals, especially in synthetic textiles. Examples include wastewater treatment projects like «GoJelly», which uses jellyfish mucus to capture microplastics, and laundry filters like «Cora Ball» and «Fibre Free». Household filtration systems such as «Lint LUV-R» and «Showerloop» further aid in microplastic removal from domestic water sources.

Based on all of the above, we begin to understand the global nature of the ongoing pollution. It is safe to say that not only we but also the next generation will face the consequences. Each of us has the opportunity to influence this situation by being careful about the environment.

Conclusion

Plastic waste pollution poses a significant threat to both ecosystems and human health, necessitating urgent and impactful actions to mitigate its effects. The key points identified in this work are as follows:

1. The Scale of the Problem: Plastic waste permeates all corners of the planet, accumulating in both oceans and land, leading to severe environmental consequences.
2. Environmental Consequences: The breakdown of plastic into micro-particles threatens biodiversity, and absorbed toxins can enter food chains, posing a risk to both animal and human health.
3. Human Health: Toxic substances released from plastic waste can accumulate in the human body through food and water, creating potential health threats.
4. Need for Action: To reduce the environmental impact of plastic waste, it is essential to lower plastic consumption, improve waste management systems, and increase public education on environmental responsibility. These actions are crucial in minimizing the harmful effects of plastic pollution on ecosystems and human health.
5. Global Approach: Solving the problem requires joint efforts at the international level, including the development of international agreements and standards aimed at reducing plastic pollution and protecting the environment.

In conclusion, to minimize the negative impact of plastic waste on the biosphere and humanity, not only is a change in consumer habits necessary, but also the active implementation of innovative technologies and policies that promote sustainable plastic waste management. Only through the combined efforts of the international community can we ensure the well-being of our planet for the future.

References

1. Adekanmbi A, Ani E, Abatan A, Izuka U, Ninduwezuor-Ehiobu N, Obaigbena A. Assessing the environmental and health impacts of plastic production and recycling. *World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences*. 2024;17(2):232–241. Doi: 10.30574/wjbphs.2024.17.2.0081.
2. Pilapitiya NT, Ratnayake AS. The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*. 2024;11:100220. Doi: 10.1016/j.clema.2024.100220.
3. Rustagi N, Pradhan SK, Singh R. Public health impact of plastics: An overview. *Indian journal of occupational and environmental medicine*. 2011;15(3):100–103. Doi: 10.4103/0019-5278.93198.
4. North EJ, Halden RU. Plastics and environmental health: The road ahead. *Reviews on environmental health*. 2013;28(1):1–8. Doi: 10.1515/reveh-2012-0030.
5. Chanda Thelma CT, Chitondo L, Ngulube L. Plastic pollution: Causes, effects, and solutions. *International Journal of Research Publication and Reviews*. 2024;5:6570–6581.
6. Wu D, Li Q, Shang X, Liang Y. Commodity plastic burning as a source of inhaled toxic aerosols. *Journal of hazardous materials*. 2021;416:125820. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125820.
7. Valavanidis A, Iliopoulos N, Gotsis G, Fiotakis K. Persistent free radicals, heavy metals, and PAHs generated in particulate soot emissions and residue ash from controlled combustion of common types of plastic. *Journal of hazardous materials*. 2008;156(1–3):277–284. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.12.019.
8. Guareschi EE. Trace metals in the environment. *IntechOpen*. Published July 25, 2023. Doi: 10.5772/intechopen.1002272.
9. Zeng X, et al. Heavy metal risk of disposable food containers on human health. *About the journal Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2023;255:114797.

10. Brahney J, Hallerud M, Heim E, Hahnenberger M, Sukumaran S. Plastic rain in protected areas of the United States. *Science*. 2020;368(6496):1257–1260. Doi: 10.1126/science.aaz5819.
11. Allen S, Allen D, Phoenix VR, Le Roux G, Durántez Jiménez P, Simonneau A, Binet S, Galop D. Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*. 2019. Doi: 10.1038/s41561-019-0335-5.
12. Sajjad M, Huang Q, Khan S, et al. Microplastics in the soil environment: A critical review. *Environmental Technology & Innovation*. 2022;27:102408. Doi: 10.1016/j.eti.2022.102408.
13. Ding L, et al. The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Province, in north-western China. *Science of The Total Environment*. 2020;720:137525. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137525.
14. Chen Y, et al. Microplastic pollution in vegetable farmlands of suburb Wuhan, central China. *Environmental Pollution*. 2020;257:113449. Doi: 10.1016/j.envpol.2019.113449.
15. Harms IK, Diekötter T, Troegel S, et al. Amount, distribution and composition of large microplastics in typical agricultural soils in Northern Germany. *Science of The Total Environment*. 2021;758:143615. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143615.
16. Liu M, et al. Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China. *Environmental Pollution*. 2018;242:855–862. Doi: 10.1016/j.envpol.2018.07.051.
17. Zhou Z, et al. Differential impacts of polyethylene microplastic and additives on soil nitrogen cycling: A deeper dive into microbial interactions and transformation mechanisms. *Science of the Total Environment*. 2024;942:173771. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173771.
18. Ng EL, et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of the Total Environment*. 2018;627:1377–1388. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.341.
19. Acarer Arat S. An overview of microplastic in marine waters: Sources, abundance, characteristics and negative effects on various marine organisms. *Desalination and Water Treatment*. 2024;317:100138. Doi: 10.1016/j.dwt.2024.100138.
20. Chandra S, Walsh KB. Microplastics in water: Occurrence, fate and removal. *Journal of contaminant hydrology*. 2024;264:104360. Doi: 10.1016/j.jconhyd.2024.104360.
21. Medina Faull LE, et al. From the Caribbean to the Arctic, the most abundant microplastic particles in the ocean have escaped detection. *Marine Pollution Bulletin*. 2024;202:116338. Doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.116338.
22. Belli M, et al. A review of plastic debris in the South American Atlantic Ocean coast – Distribution, characteristics, policies and legal aspects. *Science of the Total Environment*. 2024;938:173197. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.173197.
23. Bange A, Backes A, Garthe S, Schwemmer P. Prey choice and ingestion of microplastics by common shelducks and common eiders in the Wadden Sea World Heritage Site. *Marine Biology*. 2023;170:54. Doi: 10.1007/s00227-023-04201-8.
24. Joshi K, et al. Microplastic contamination in filter-feeding oyster *Saccostrea cucullata*: Novel insights in a marine ecosystem. *Marine Pollution Bulletin*. 2024;202:116326. Doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.116326.
25. Yang L, et al. Microplastics in drinking water: A review on methods, occurrence, sources, and potential risks assessment. *Environmental Pollution*. 2024;348:123857. Doi: 10.1016/j.envpol.2024.123857.
26. Casagrande N, et al. Ecotoxicity effect factors for plastic additives on the aquatic environment: A new approach for life cycle impact assessment. *Environmental Pollution*. 2024;341:122935. Doi: 10.1016/j.envpol.2023.122935.
27. Sui Q, et al. Bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons and their human health risks depend on the characteristics of microplastics in marine organisms of Sanggou Bay, China. *Journal of Hazardous Materials*. 2024;473:134622. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.134622.
28. Prata JC. Airborne microplastics: Consequences to human health? *Environmental Pollution*. 2018;234:115–126.
29. Maddela NR, et al. Additives of plastics: Entry into the environment and potential risks to human and ecological health. *Journal of Environmental Management*. 2023;348:119364. Doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119364.
30. Revel M, Châtel A, Mouneyrac C. Micro(nano)plastics: A threat to human health? *Curr Opin Journal of Environmental Science and Health*. 2018;1:17–23. Doi: 10.1016/j.coesh.2017.10.003.
31. Zou J, et al. Adsorption of three bivalent metals by four chemically distinct microplastics. *Chemosphere*. 2020;248:126064. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126064.
32. Cáceres-Farias L, et al. Macro and microplastic intake in seafood varies by the marine organism's feeding behavior: Is it a concern to human health? *Heliyon*. 2023;9:e16452. Doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16452.
33. Mahu E, et al. Human health risk and food safety implications of microplastic consumption by fish from coastal waters of the eastern equatorial Atlantic Ocean. *Food Control*. 2023;145:109503. Doi: 10.1016/j.foodcont.2022.109503.
34. Gao F, et al. Study on the capability and characteristics of heavy metals enriched on microplastics in marine environments. *Marine Pollution Bulletin*. 2019;144:61–67. Doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.04.039.
35. Tang S, et al. Pb(II) uptake onto nylon microplastics: Interaction mechanism and adsorption performance. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;386:121960. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121960.
36. Schmaltz E, et al. Plastic pollution solutions: Emerging technologies to prevent and collect marine plastic pollution. *Environment International*. 2020;144:1060.
37. Yue Y, et al. Looking for a Chinese solution to global problems: The situation and countermeasures of marine plastic waste and microplastics pollution governance system in China. *Chin Chinese Journal of Population, Resources and Environment*. 2021;19:352–357. Doi: 10.1016/j.cjpre.2022.01.008.
38. Willis KA, et al. Addressing cultural context is the missing piece in policy solutions to plastic pollution. *Environmental Science & Policy*. 2024;159:103829. Doi: 10.1016/j.envsci.2024.103829.
39. Chiani MM, et al. The role of organisms' size in microplastic pollution monitoring: Insights from *Mytilaster lineatus* and *Amphibalanus improvisus*. *Marine Environmental Research*. 2024;204:106863. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2024.106863>.
40. Siwach S, et al. Unveiling the ecotoxicological impact of microplastics on organisms - the persistent organic pollutant (POP): A comprehensive review. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2024;266:104397. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2024.104397>.
41. Rajmohan KVS, et al. Plastic pollutants: effective waste management for pollution control and abatement. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 2019;12:72–84. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.08.006>.
42. Editorial. Solutions for plastic pollution. *Nature Geoscience*. 2023;16:655. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01255-7>.
43. Schmaltz E, et al. Plastic pollution solutions: emerging technologies to prevent and collect marine plastic pollution. *Environment International*. 2020;144:106067. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106067>.

СОДЕРЖАНИЕ

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

<i>Буткевич Ю. И.</i> Формирование когнитивных компонентов экологического сознания в процессе защиты языкового проекта.....	4
---	---

ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

<i>Кулеш В. Ф.</i> Формирование современного ареала восточной речной креветки <i>Macrobrachium nipponense</i> (De Haan).....	10
<i>Углянец А. В., Шумак С. В., Гарбарук Д. К.</i> Запас надземной фитомассы нижних ярусов лесной растительности в черноольшанике папоротниковом на юго-востоке Полесья.....	24
<i>Сушко Г. Г., Ткачёнок А. С.</i> Обобщенные линейные смешанные модели (GLMM) в исследованиях экологии сообществ с использованием статистической среды R.....	37

МЕДИЦИНСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Батян А. Н., Демешко П. Д., Гончарова Е. В., Домашникова Т. А.</i> Ретроспективный анализ влияния перерывов в лучевой терапии на долгосрочные результаты лечения аденокарциномы предстательной железы...48	48
<i>Тургунова Б. Э., Аллаева К. Б., Жильцова Ю. В.</i> Влияние курения на биоэлементный статус молодых людей.....	56

ПРОМЫШЛЕННАЯ И АГРАРНАЯ ЭКОЛОГИЯ

<i>Ломонос О. Л., Ломонос М. М.</i> Анализ приемов увеличения производства маслосемян рапса и их экологическая составляющая.	67
<i>Цыбулько Н. Н., Цырибко В. Б., Юхновец А. В., Жукова И. И., Логачев И. А.</i> Противозерозионная стойкость дерново-подзолистых почв на разных агрофонах.....	77
<i>Амирметова К. В., Алиев Э. А.</i> Пластиковые отходы: влияние на экосистему планеты	85

CONTENTS

SOCIAL AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

<i>Butkevich Yu. I.</i> Formation of cognitive components of environmental consciousness in the process of protecting a language project.....	4
---	---

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

<i>Kulesh V. F.</i> Formation of the modern areas of the eastern river prawn <i>Macrobrachium nipponense</i> (De Haan).....	10
<i>Uglyanets A. V., Shumak S. V., Garbaruk D. K.</i> Aboveground phytomass stock of the lower tiers of forest vegetation in black alder fern forest type in the south-east of Polesie.....	24
<i>Sushko G. G., Tkachenok A. S.</i> Generalized linear mixed models (GLMM) in community ecology studies using the R statistical environment.....	37

MEDICAL ECOLOGY

<i>Batyan A. N., Demeshko P. D., Hancharova E. V., Damashnikava T. A.</i> Retrospective analysis of the impact of interruptions in radiation therapy on long-term treatment outcomes for prostate adenocarcinoma.....	48
<i>Turgunova B. E., Alayeva K. B., Zhylytsova Yu. V.</i> Influence of smoking on the biolemmental status of young people.....	56

INDUSTRIAL AND AGRICULTURAL ECOLOGY

<i>Lamanos V. L., Lamanos M. M.</i> Analysis of methods for increasing the production of rapeseed oilseeds and their environmental component.....	67
<i>Tsybulka M. M., Tsyribko V. B., Yukhnovets A. V., Zhukova I. I., Logachov I. A.</i> Erosion stability of sod-podzolic soils in different agricultural fields.....	77
<i>Amirmatova K. V., Aliyev E. A.</i> Plastic waste: impact on the planet's ecosystem.....	85

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.
№ 1. 2025**

Учредитель:
Белорусский государственный университет

Юридический адрес: пр. Независимости, 4,
220030, Минск.

Почтовый адрес: ул. Долгобродская, 23/1,
220070, Минск.

Тел. 398-89-34, 398-93-44.

www.iseu.bsu.by

E-mail: jecology@bsu.by

«Журнал Белорусского государственного
университета. Экология» издается с сентября 2017 г.
До августа 2017 г. выходил под названием
«Экологический вестник»
(ISSN 1994-2087).

Редактор *Л. М. Корневская*
Технический редактор *М. Ю. Мошкова*
Корректор *Л. М. Корневская*

Подписано в печать 27.03.2025.
Тираж 100 экз. Заказ 574.

Республиканское унитарное предприятие
«Информационно-вычислительный центр
Министерства финансов Республики Беларусь»
ЛП № 02330/89 от 3 марта 2014.
Ул. Кальварийская, 17, 220004, Минск.

© БГУ, 2025

**Journal
of the Belarusian State University. Ecology.
No. 1. 2025**

Founder:
Belarusian State University

Registered address: 4 Niezaliežnasci Ave.,
220030, Minsk.

Correspondence address: 23/1 Daŭhabrodskaja Str.,
220070, Minsk.

Tel. 398-89-34, 398-93-44.

www.iseu.bsu.by

E-mail: jecology@bsu.by

«Journal of the Belarusian State University. Ecology»
published since September, 2017.
Until August, 2017 named «*Ekologičeskii vestnik*»
(ISSN 1994-2087).

Editor *L. M. Korenevskaya*
Technical editor *M. Yu. Moshkova*
Proofreader *L. M. Korenevskaya*

Signed print 27.03.2025.
Edition 100 copies. Order number 574.

RUE «Information Computing Center of the Ministry
of Finance of the Republic of Belarus».
License for publishing No. 02330/89, 3 March, 2014.
17 Kalvaryjskaya Str., 220004, Minsk.

© BSU, 2025